



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**SPEKTROSKOPICKÁ ANALÝZA ELEKTRICKÉHO  
OBLOUKU**

SPECTROSCOPIC ANALYSIS OF AN ELECTRIC ARC

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Tadeáš Hartman**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. David Šimek**

**BRNO 2019**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Tadeáš Hartman

**ID:** 185889

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Spektroskopická analýza elektrického oblouku

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Nastudujte spektroskopické metody pro diagnostiku plazmatu.
2. Vytvořte přehled výhod a nevýhod jednotlivých metod a na základě nabytých informací rozhodněte, která metoda je nejvhodnější pro diagnostiku plazmatu elektrického oblouku.
3. Proveďte měření časového vývoje spekter záření oblouku u konkrétního elektrického přístroje.
4. Ze změřených spekter určete časový vývoj relativního složení plazmatu a teploty oblouku.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] GROSS, Boleslav. Elektrické výboje v plynech. Praha: SNTL, 1967.
- [2] GROSS, Boleslav a Otto HAVELKA. Elektrické přístroje II. 2. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1980.
- [3] HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje I. 3. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1982.
- [4] GROSS, Boleslav. Měření vysokých teplot. Praha: STÁTNÍ NAKLADATELSTVÍ TECHNICKÉ LITERATURY, 1962.

**Termín zadání:**

**Termín odevzdání:**

**Vedoucí práce:** Ing. David Šimek

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá spektroskopickým rozbořem elektrických oblouků. V první části práce je vysvětlena teorie o vzniku a vlastnostech elektrických výbojů, práce se zaměřuje konkrétně na elektrický oblouk. Dále jsou zde uvedeny metody pro rozbor složení a teploty elektrického oblouku. V další části se práce zabývá praktickým využitím těchto metod pro identifikaci prvků obsažených v materiálu elektrod, mezi kterými probíhal obloukový výboj, určením teploty tohoto oblouku a také určením teploty elektrod. V poslední části jsou tyto metody využity pro rozbor časového vývoje složení a teploty elektrického oblouku vznikajícího na kontaktech stykače zatíženého odporovou zátěží.

## **Klíčová slova**

Elektrický výboj, elektrický oblouk, spektroskopie, složení plazmatu, měření teploty.

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with spectroscopic diagnostics of electric arcs. The first part explains the creation and properties of electric discharges, especially electric arcs. Methods for composition and temperature analysis of electric arcs are also given there. The next part deals with practical use of these methods for identification of elements contained in electrodes between which an arc discharge was happening, measurement of the arc temperature and also measurement of the temperature of the electrodes. In the last part, these methods are also used for the analysis of time progression of composition and temperature of an electric arc created on a contactor's contacts with the resistive load.

## **Keywords**

Electric discharge, electric arc, spectroscopy, plasma composition, temperature measurement

### **Bibliografická citace:**

HARTMAN, Tadeáš. *Spektroskopická analýza elektrického oblouku*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117459>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce David Šimek.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Spektroskopická analýza elektrického oblouku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **22. května 2019**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, Ing. Davidu Šimkovi, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **22. května 2019**

.....  
podpis autora

# Obsah

Seznam symbolů a zkratk .....	9
Seznam obrázků .....	10
Seznam tabulek .....	12
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
<b>2. ELEKTRICKÉ VÝBOJE .....</b>	<b>14</b>
2.1 Charakteristika výbojů .....	14
2.2 Plazma výbojů .....	15
2.3 Elektrický oblouk .....	16
<b>3. SPEKTROSKOPIE .....</b>	<b>18</b>
3.1 Záření ve viditelném spektru .....	18
3.1.1 Emisní a absorpční spektra .....	18
3.1.2 Atomová spektra .....	19
3.1.3 Molekulová spektra .....	19
3.2 Spektrometry .....	19
3.2.1 Monochromátor .....	19
3.2.1.1 Hranol .....	20
3.2.1.2 Mřížka .....	20
3.2.1.3 Uspořádání monochromátoru .....	21
3.2.2 Detektor – CCD čip .....	21
3.3 Optická emisní spektroskopie (OES) .....	21
3.3.1 Plamenová fotometrie .....	22
3.3.2 Elektrické zdroje .....	23
3.3.3 Buzení v plazmatu .....	23
3.4 Atomová absorpční spektroskopie (AAS) .....	23
3.5 Měření teploty pomocí spektroskopie .....	24
3.5.1 Určení teploty elektrody ze spojitého spektra .....	24
3.5.2 Určení teploty porovnáním dvou spektrálních čar .....	24
3.5.3 Určení teploty pomocí pyrometrické přímky .....	26

<b>4. ANALÝZA ELEKTRICKÉHO OBLOUKU MEZI DVĚMA ELEKTRODAMI .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1 Měřicí obvod.....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Kalibrace spektrometru .....</b>	<b>27</b>
<b>4.3 Určení teploty ze spojitého záření elektrody .....</b>	<b>29</b>
<b>4.4 Určení složení plazmatu .....</b>	<b>31</b>
<b>4.5 Určení teploty plazmatu .....</b>	<b>32</b>
<b>4.5.1 Určení teploty porovnáním dvou spektrálních čar.....</b>	<b>32</b>
<b>4.5.2 Určení teploty pomocí pyrometrické přímky .....</b>	<b>35</b>
<b>5. ANALÝZA ELEKTRICKÉHO OBLOUKU VE STYKAČI.....</b>	<b>37</b>
<b>5.1 Měřicí obvod.....</b>	<b>37</b>
<b>5.2 Průběh proudu a napětí na stykači.....</b>	<b>38</b>
<b>5.3 Určení časového vývoje složení.....</b>	<b>40</b>
<b>5.4 Určení časového vývoje teploty na kontaktech stykače.....</b>	<b>46</b>
<b>5.4.1 Určení časového vývoje teploty pomocí dvou spektrálních čar ..</b>	<b>46</b>
<b>5.4.2 Určení časového vývoje teploty pomocí pyrometrické přímky ..</b>	<b>48</b>
<b>6. ZÁVĚR.....</b>	<b>52</b>
<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>53</b>



# Seznam symbolů a zkratk

## Zkratky:

AAS	...	atomová absorpční spektroskopie
CCD	...	charge-coupled device (zařízení s vázanými náboji)
NIST	...	National Institute of Standards and Technology
OES	...	optická emisní spektroskopie

## Symboly:

$A_{mn}$	...	přechodová pravděpodobnost	( $s^{-1}$ )
$c$	...	rychlost světla	( $m \cdot s^{-1}$ )
$g_m$	...	váha přechodové pravděpodobnosti	(-)
$h$	...	Planckova konstanta	( $J \cdot s$ )
$k$	...	Boltzmannova konstanta	( $J \cdot K^{-1}$ )
$I$	...	proud	(A)
$I_{mn}$	...	intenzita záření	( $W \cdot m^{-2}$ )
$n$	...	koncentrace elektronů	( $m^{-3}$ )
$T$	...	teplota	(K)
$U$	...	napětí	(V)
$U_m$	...	energie m-té hladiny	(J)
$V_{mn}$	...	frekvence vyzářené energie	(Hz)
$W$	...	tepelná energie	(J)
$W_a$	...	prošlá energie	(J)
$\lambda$	...	vlnová délka	(m)
$\psi$	...	úhel vypnutí	(°)

# Seznam obrázků

Obr. 2.1: Charakteristika elektrických výbojů [1] .....	15
Obr. 2.2: Schéma závislosti tepelné energie na teplotě [2] .....	15
Obr. 2.3: Schéma stejnosměrného elektrického oblouku [2] .....	17
Obr. 3.1: Absorpční a emisní spektrum vodíku [5] .....	19
Obr. 3.2: Monochromátor s hranolem [7] .....	20
Obr. 3.3: Uspořádání Czerny-Turner [7] .....	21
Obr. 3.4: Blokové schéma optické emisní spektroskopie [8] .....	22
Obr. 3.5: Plamenový fotometr [8] .....	22
Obr. 3.6: Blokové schéma atomové absorpční spektroskopie [9] .....	23
Obr. 4.1: Schéma měřicího obvodu .....	27
Obr. 4.2: Změřené spektrum zářivky .....	28
Obr. 4.3: Spektrum elektrody – měření č.1 .....	29
Obr. 4.4: Spektrum elektrody – měření č.2 .....	29
Obr. 4.5: Spektrum s Planckovou funkcí – měření č.1 .....	30
Obr. 4.6: Spektrum s Planckovou funkcí – měření č.2 .....	30
Obr. 4.7: Spektrum záření plazmatu .....	31
Obr. 4.8: Čára s vlnovou délkou 406,26 nm .....	34
Obr. 4.9: Čára s vlnovou délkou 521,82 nm .....	34
Obr. 4.10: Pyrometrická přímka z čar mědi .....	36
Obr. 5.1: Schéma obvodu pro měření spekter na stykači .....	37
Obr. 5.2: Sestava pro měření elektrického oblouku na stykači .....	38
Obr. 5.3: Průběh napětí a proudu – měření č.1 .....	38
Obr. 5.4: Průběh napětí a proudu – měření č.2 .....	39
Obr. 5.5: Průběh napětí a proudu – měření č.3 .....	39
Obr. 5.6: Spektrum v čase 0,4 ms .....	41
Obr. 5.7: Spektrum v čase 0,8 ms .....	42
Obr. 5.8: Spektrum v čase 1,2 ms .....	42
Obr. 5.9: Spektrum v čase 1,6 ms .....	42
Obr. 5.10: Spektrum v čase 2,0 ms .....	43

Obr. 5.11: Spektrum v čase 2,4 ms .....	43
Obr. 5.12: Spektrum v čase 2,8 ms .....	43
Obr. 5.13: Spektrum v čase 3,2 ms .....	44
Obr. 5.14: Spektrum v čase 3,6 ms .....	44
Obr. 5.15: Spektrum v čase 4,0 ms .....	44
Obr. 5.16: Spektrum v čase 4,4 ms .....	45
Obr. 5.17: Spektrum v čase 4,8 ms .....	45
Obr. 5.18: Spektrum v čase 5,2 ms .....	45
Obr. 5.19: Spektrum v čase 5,6 ms .....	46
Obr. 5.20: Spektrum v čase 6,0 ms .....	46
Obr. 5.21: Časový vývoj teploty porovnáním dvou čar .....	48
Obr. 5.22: Pyrometrická přímka pro čas 2 ms .....	49
Obr. 5.23: Pyrometrická přímka pro čas 2,4 ms .....	49
Obr. 5.24: Pyrometrická přímka pro čas 2,8 ms .....	50
Obr. 5.25: Pyrometrická přímka pro čas 3,2 ms .....	50
Obr. 5.26: Pyrometrická přímka pro čas 3,6 ms .....	50
Obr. 5.27: Pyrometrická přímka pro čas 4 ms .....	51
Obr. 5.28: Časový vývoj teploty pomocí pyrometrické přímky .....	51

## Seznam tabulek

Tab. 4.1: Vlnové délky spektrálních čar rtuti .....	28
Tab. 4.2: Vlnové délky spektrálních čar mědi .....	32
Tab. 4.3: Energetické hladiny spektrálních čar .....	33
Tab. 4.4: Parametry spektrálních čar mědi .....	35
Tab. 5.1: Seznam přístrojů použitých pro měření spekter na stykači .....	37
Tab. 5.2: Parametry určené z průběhů napětí a proudu .....	40
Tab. 5.3: Identifikované prvky ve spektrech stykače .....	41
Tab. 5.4: Parametry spektrálních čar dusíku .....	47
Tab. 5.5: Relativní intenzity spektrálních čar dusíku .....	47
Tab. 5.6: Časový vývoj teploty .....	48
Tab. 5.7: Hodnoty logaritmů pro získání pyrometrické přímky .....	49
Tab. 5.8: Teploty vypočítané pomocí pyrometrické přímky .....	51

# 1. ÚVOD

Spektroskopie je věda, která slouží ke zkoumání interakce elektromagnetického záření s hmotou. Každá látka vyzařuje nebo naopak pohlcuje záření na určité vlnové délce. Toto záření je pro každou látku specifické a nazýváme ho spektrem. Proto jsou spektroskopické metody vhodné pro rozbor fyzikálních vlastností, jako je složení nebo teplota látek všech skupenství. Toho se dá využít v široké škále odvětví, např. v chemické analýze minerálů a kovů, forenzní chemii, astrofyzice nebo lékařství.

Práce se zabývá především analýzou elektrického oblouku pomocí spektroskopie a je rozdělena do dvou hlavních částí, teoretické a praktické. Obsahem teoretické části je seznámení se vznikem a vlastnostmi elektrických výbojů, mezi něž oblouk patří. V práci jsou představeny různé typy spekter, které můžeme pomocí spektroskopie pozorovat a také základní části spektrometrů, které nám umožňují tato spektra pozorovat. Dále jsou zde uvedeny dvě základní spektroskopické metody a jejich výhody a nevýhody. Na konci teoretické části jsou uvedeny metody pro výpočet teploty pomocí spektroskopie.

V první polovině praktické části je ukázáno využití emisní spektroskopie k určení složení plazmatu elektrického oblouku, výpočtu teploty ze spektra plazmatu a výpočtu teploty elektrody ze spojitého záření. V druhé polovině je emisní spektroskopie využita k měření spekter na stykači, kde byl zjištěn časový vývoj složení plazmatu elektrického výboje na kontaktech a také časový vývoj teploty.

## 2. ELEKTRICKÉ VÝBOJE

### 2.1 Charakteristika výbojů

Elektrický výboj je většinou krátkodobý děj, při kterém dochází k průchodu elektrického proudu prostředím, které je za normálních podmínek nevodivé.

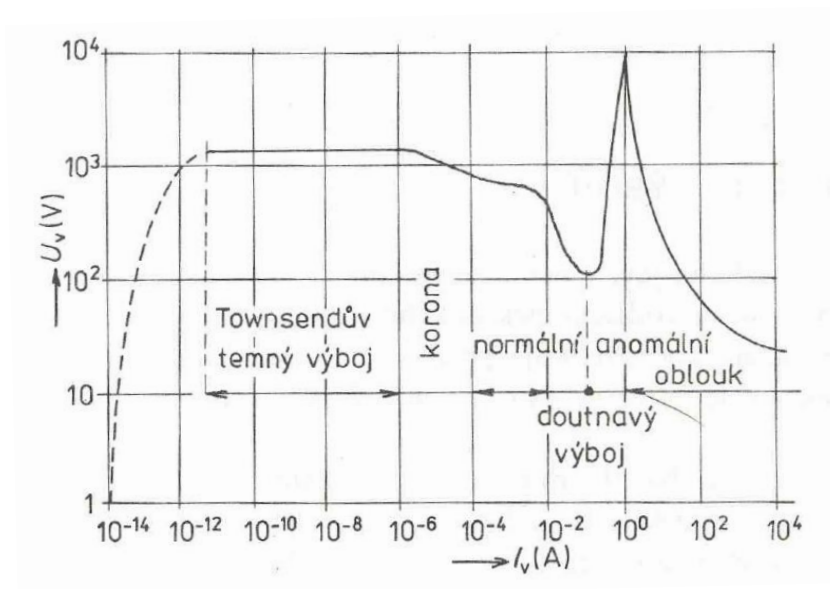
Elektrický proud prochází libovolným prostředím po přivedení nebo vytvoření elektricky nabitých částic. U kovových vodičů jsou pomocí zdroje uvolňovány a uváděny do pohybu volné elektrony. V okolí těchto vodičů, ze kterých jsou tvořeny elektrody, se mění elektronová vodivost na iontovou. Přesto je zde proud veden převážně pomocí elektronů. V plynech může být proud veden pouze tehdy když plyn obsahuje elektricky nabitě částice (elektrony a ionty) a pokud je na elektrody přivedeno napětí.

Výboje se dělí podle velikosti procházejícího proudu a také částečně podle napětí na elektrodách na:

- temný výboj,
- koronový výboj,
- doutnavý výboj,
- jiskrový výboj,
- obloukový výboj.

Vlastnosti elektrických výbojů určuje procházející proud, napětí na elektrodách, složení plazmatu výboje, tlak, způsob chlazení, elementární pochody ve výbojové dráze, tvar a materiál elektrod. Tyto parametry, které jsou vzájemně závislé, určují další vlastnosti výbojů, jako jsou např. průměr výbojové dráhy, průběh napětí podél osy plazmatu, vlastnosti anodového a katodového prostoru a teplota elektronů, iontů a molekul plazmatu.

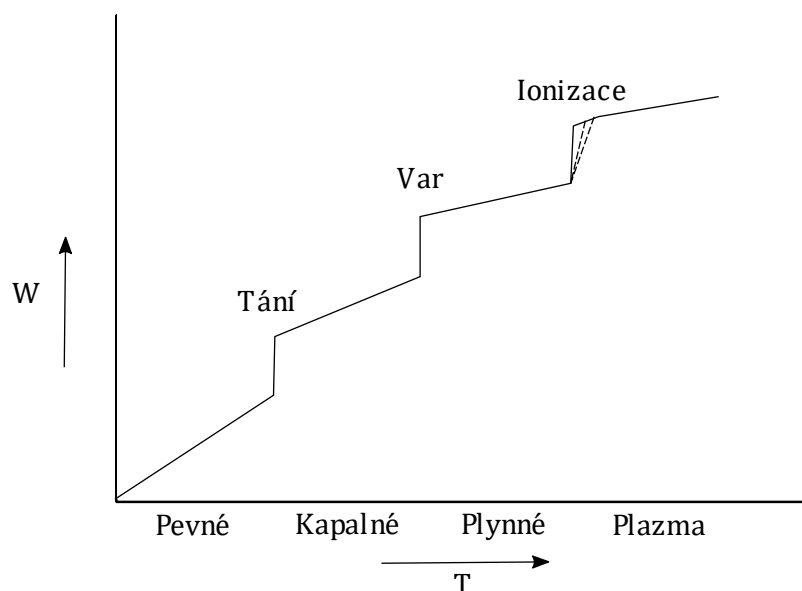
Na obrázku 2.1 můžeme vidět závislost napětí na elektrodách na procházejícím proudu nazývanou „charakteristika elektrického výboje“. Tato charakteristika je pouze přibližná, je z ní však patrné, že každý druh výboje se nachází v určitém rozmezí proudů a napětí. [1]



Obr. 2.1: Charakteristika elektrických výbojů [1]

## 2.2 Plazma výbojů

Hmota se dělí podle obsahu tepelné energie na čtyři skupenství. Tato skupenství jsou pevné, kapalné, plynné a plazma. Na obrázku 2.2, který zobrazuje schéma závislosti tepelné energie na teplotě můžeme vidět jednotlivá skupenství.



Obr. 2.2: Schéma závislosti tepelné energie na teplotě [2]

Jak můžeme vidět na obrázku, plazma se vyznačuje velkým množstvím tepelné energie. Zahřívání plynů způsobuje zvyšování kinetické energie molekul a při dostatečně velké teplotě dochází k disociaci molekul, tj. k jejich rozdělení na jednodušší částice nebo atomy. Tyto atomy se při vzájemných srážkách nabudí a po krátké době dojde k vyzaření fotonů. Některé atomy mají dostatečnou kinetickou energii k ionizaci neboli vytržení elektronu z obalu atomu.

Při ionizaci se v plynu objeví kladně a záporně nabitě ionty. V takto ionizovaném plynu, nazývaném plazma, působí na nabitě částice elektrostatické síly a z toho důvodu na částice sebe působí ve větších vzdálenostech. Plazma se vyznačuje kvazineutralitou, což znamená, že počet záporných nábojů je stejný jako počet kladných nábojů a vně plazmy se jejich vzájemné působení vyrovnává. Základními vlastnostmi plazmy jsou především dobrá elektrická vodivost a intenzivní vyzařování.

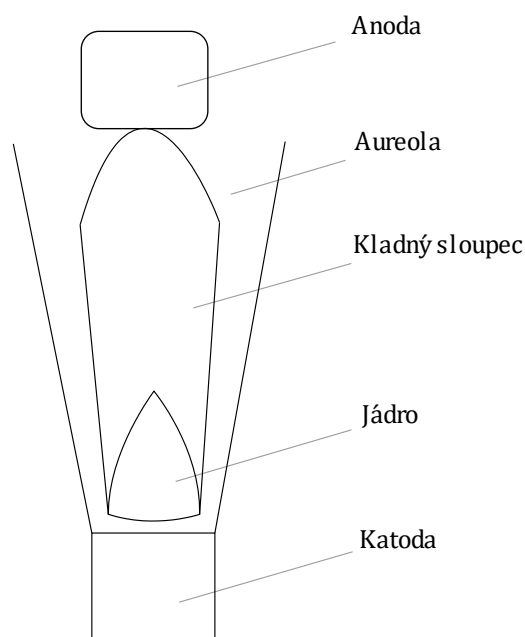
Většina elektrických výbojů emituje záření pouze svým plazmatem, výjimku tvoří elektrický oblouk, u něhož vyzařují i elektrody. Záření elektrod je u ostatních druhů výbojů zanedbatelné. Nízkotlaké plazma vyzařuje atomové nebo molekulové spektrum, u vysokotlaké plazmy se objevuje i spektrum spojitě. [2]

## 2.3 Elektrický oblouk

Elektrický oblouk je výboj v plynu, který vzniká většinou za atmosférického nebo zvýšeného tlaku. Vyznačuje se velkou proudovou hustotou, tudíž i velkou teplotou plazmatu a vysokou intenzitou záření včetně ultrafialového, které je pro člověka nebezpečné. Mezi elektrodami oblouku je malý rozdíl potenciálů a katodová skvrna má vysokou teplotu.

Elektrické oblouky se dělí podle druhu napájecího proudu na stejnosměrné a střídavé. Stejnosměrné oblouky mají neměnnou polaritu elektrod, zatímco u střídavých se polarita elektrod periodicky mění. Na obrázku 2.3 můžeme vidět schéma stejnosměrného oblouku. Toto platí i pro oblouky střídavé, kde však nemůžeme vizuálně rozlišit katodu a anodu z důvodu proměnné polarity.





**Obr. 2.3: Schéma stejnosměrného elektrického oblouku [2]**

Bezprostředně v okolí katody se nachází jádro oblouku, neboli katodový paprsek plazmatu. Kolem tohoto jádra je kladný sloupec dosahující až k anodě. Vně kladného sloupce se nachází aureola, která se rozšiřuje směrem k anodě. Barvu oblouku ovlivňuje prostředí, ve kterém oblouk hoří a také materiál elektrod.

Podle materiálu, ze kterého jsou vyrobeny elektrody, se střídavé i stejnosměrné oblouky dělí na oblouky s uhlíkovými a kovovými elektrodami. Oblouky s kovovými elektrodami se dělí na tři skupiny. V první skupině je doutnavý oblouk, který vzniká při vysokém napětí za sníženého tlaku po zkratování předřadného odporu. Teplota katody tohoto oblouku je vysoká, zatímco anoda zůstává studená. Druhá skupina vzniká při zahřátí anody na teplotu vyšší, než je teplota katody a třetí skupina má vysokou teplotu katody i anody.

Při vytváření je oblouk v přechodném stadiu, které můžeme nalézt na charakteristice elektrických výbojů na obrázku 1.1 mezi doutnavým výbojem a korunou. V tomto stadiu je plazma oblouku v teplotně nerovnovážném stavu, tj. elektrony, ionty, atomy a molekuly nemají stejnou teplotu. Po velmi krátké době, řádově  $10^{-6}$  s, dojde k vytvoření oblouku a k přechodu plazmy do teplotně rovnovážného stavu.

Závislost napětí mezi elektrodami na procházejícím proudu stejnosměrného oblouku se nazývá „statická charakteristika“, u střídavého oblouku je proměnná s časem a nazývá se „dynamická charakteristika“. [1], [2], [3]

## 3. SPEKTROSKOPIE

Spektroskopie je jedna z nejstarších a nejběžněji používaných metod pro rozbor plazmy. Vyzařující atomy a molekuly nám objasňují vlastnosti a procesy probíhající uvnitř plazmy a také nám umožňují její pozorování v reálném čase. Mezi hlavní výhody metody patří to, že nedochází k ovlivnění měřeného objektu a naměřená spektra lze získat poměrně jednoduchým způsobem, jejich interpretace však může být velmi složitá. Přesto je spektroskopie nenahraditelným nástrojem pro zkoumání vlastností látek.

### 3.1 Záření ve viditelném spektru

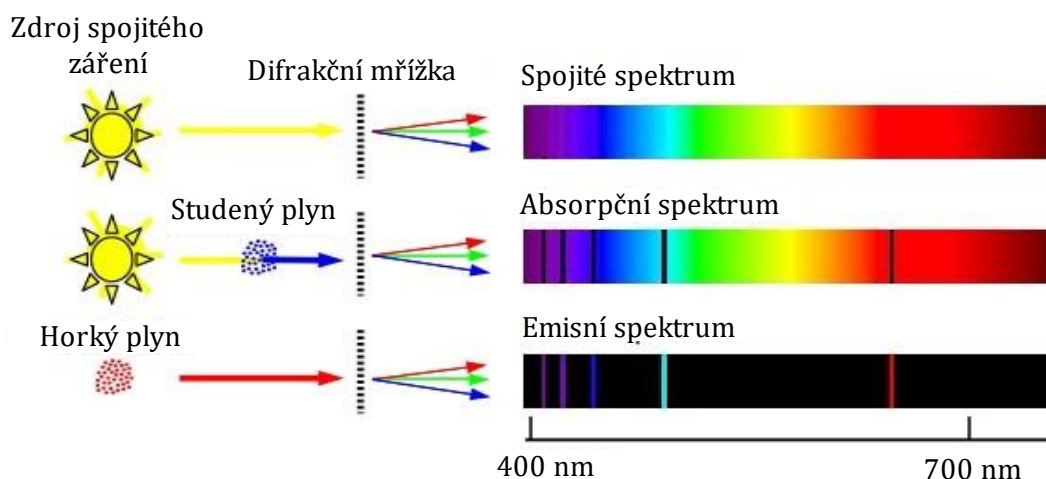
Elektromagnetické vlny mají délku od pikometrů (gama vlny) po kilometry (rádiové vlny). Viditelné záření je definováno v rozsahu od 380 do 780 nm, ale běžně se rozšiřuje i do ultrafialového i infračerveného záření, přibližně v rozsahu od 200 nm do 1  $\mu\text{m}$ . Tato oblast je pro spektroskopii velmi výhodná, obzvláště díky vlastnostem vzduchu a skla. Při vlnové délce pod 200 nm totiž vzduch i sklo přestávají propouštět světlo a nad 1  $\mu\text{m}$  se zvyšuje šum na pozadí. [4]

#### 3.1.1 Emisní a absorpční spektra

Spektrum tuhých látek tvoří sled barev, které přecházejí z jedné do druhé a nazývá se spektrum spojitě. Záření plynu vzniká v obalu atomu a nazývá se proto spektrem atomovým nebo čárovým. Plyn složený z molekul vytváří spektrum, které nazýváme molekulové nebo pásové. Všechna tato spektra vznikají vyzářením (emisí), z toho důvodu se nazývají spektra emisní.

Průchodem spojitěho záření skrz prostředí, které je schopno vyzářit čárové nebo pásové spektrum můžeme dostat spojitě spektrum překryté spektrem čárovým nebo pásovým. Toto nastane, pokud je teplota zdroje spojitěho záření menší než teplota prostředí s nespojitým zářením. Pokud jsou teploty stejné, nespojitě spektrum na spojitěm pozadí zcela vymizí.

Pokud je teplota zdroje spojitěho záření větší než teplota prostředí s čárovým nebo pásovým zářením, vznikne spojitě spektrum s tmavými čarami tam, kde bychom v emisním spektru viděli spektrální čáry. Toto spektrum se nazývá spektrem absorpčním. Principem vzniku těchto spekter je absorpce fotonů ze spojitěho záření v atomech nebo molekulách prostředí, kterým tyto fotony procházejí. Tato absorpce nastane v případě, že je energie fotonů rovna energii potřebné k přechodu elektronů z jednoho energetického stavu do druhého. Na obrázku 3.1 můžeme vidět tři spektra. První je spektrum zdroje spojitěho záření, druhé je absorpční spektrum vodíku, které vznikne průchodem zdroje spojitěho záření studeným plynem a třetí představuje emisní spektrum vodíku.



**Obr. 3.1: Absorpční a emisní spektrum vodíku [5]**

### 3.1.2 Atomová spektra

Pokud se plyny a páry zahřejí na dostatečně vysokou teplotu, dojde k rozštěpení molekul na atomy a vyzáření energie, které je soustředěno v úzkém rozsahu vlnových délek. Tyto monochromatické obory se nazývají spektrální čáry a dohromady vytvářejí atomové spektrum.

V roce 1885 vyjádřil Johann Balmer zákonitost polohy čar ve spektru vodíku. Ty byly určeny vlnovou délkou (frekvencí), při které jsou vyzářeny. Až o několik let později vysvětlil Bohrov model atomu a vlnová mechanika zákonitosti ve spektrech atomů. Pomocí kvantových podmínek a klasických pohybových zákonů Niels Bohr popsal děje probíhající uvnitř atomů.

### 3.1.3 Molekulová spektra

Při analýze zářících plynů můžeme nalézt taková spektra, která nejsou způsobena atomy, ale jde o spektra zářících molekul. Ty vznikají rotací molekul kolem jejich těžiště a vibrací jejich atomů kolem rovnovážné polohy. Tato spektra již nemají vzhled úzkých monochromatických čar, ale jsou tvořena širšími pásy, nazývají se proto spektra pásová. [5], [6]

## 3.2 Spektrometry

Spektrometry jsou přístroje sloužící k měření spekter elektromagnetického záření. Můžeme pomocí nich určit chemické složení látek nebo vlastnosti elektrického oblouku. Součástí spektrometru je monochromátor a detektor záření.

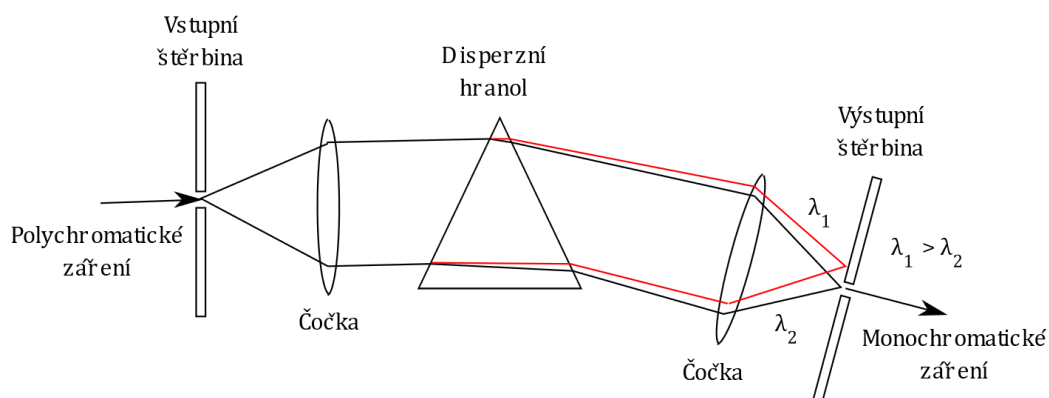
### 3.2.1 Monochromátor

Principem funkce monochromátoru je získání úzkého pásu vlnových délek z polychromatického záření. Skládá se ze vstupní a výstupní štěrbin, disperzního

prvku, kterým může být hranol nebo mřížka a pomocných zaostřovacích čoček nebo zrcadel. Polychromatické záření, které dopadne na vstupní štěrbinu je částečně propuštěno do monochromátoru, kde po zaostření prostřednictvím čoček nebo zrcadel dopadá na disperzní prvek. Disperzní prvky jsou nejdůležitější součástí monochromátoru a v současnosti ve spektrometrech převládají mřížky nad hranoly. V disperzním prvku dojde k rozložení záření na jednotlivé vlnové délky a toto rozložené záření je dále vedeno pomocí čoček nebo zrcadel na výstupní štěrbinu. V závislosti na velikosti výstupní štěrbiny z monochromátoru vychází velice úzký pás vlnových délek, který můžeme označit jako monochromatické záření.

### 3.2.1.1 Hranol

Disperzní hranoly se v současnosti již ve spektrometrech většinou nepoužívají především z důvodu větší pořizovací ceny a nelineární stupnice vlnových délek. Na obrázku 3.2 je zobrazen princip funkce monochromátoru s disperzním hranolem. Můžeme zde vidět, že různé vlnové délky mají různý index lomu, přičemž menší vlnové délky mají index lomu větší než větší vlnové délky.



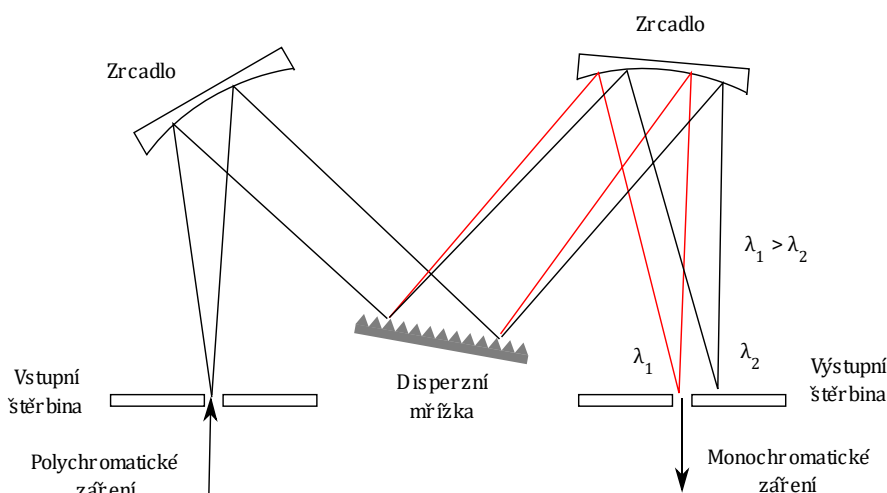
**Obr. 3.2: Monochromátor s hranolem [7]**

### 3.2.1.2 Mřížka

Většina spektrometrů obsahuje jako disperzní prvek mřížku, která způsobuje disperzi pomocí odrazu, difrakce a interference ohnutých a odražených paprsků. Při dopadu rovnoběžného svazku paprsků se paprsky jednotlivých vlnových délek odrazí od mřížky pod různým úhlem. Pokud je dráhový rozdíl paprsků násobkem vlnové délky, paprsky jsou ve fázi (dochází k interferenci) a v určitých místech vznikají maxima. Kvalita disperzní mřížky závisí na její hustotě, která je dána počtem vrypů na milimetr, úhlem, který svírají stěny mřížky s její normálou a také rozsah vlnových délek, pro který má tato mřížka nejvyšší účinnost.

### 3.2.1.3 Uspořádání monochromátoru

Uspořádání monochromátoru může být sekvenční, simultánní nebo simultánně-sekvenční. U sekvenčních monochromátorů se měří intenzita záření dopadajícího na výstupní štěrbinu postupně pro všechny vlnové délky. Jedním z nejběžnějších příkladů sekvenčního uspořádání je uspořádání Czerny-Turner, které můžeme vidět na obrázku 3.3. Toto uspořádání využívá dvou konkávních zrcadel a rovinné otočné mřížky. Sekvenční uspořádání umožňují snímání libovolné části spektra, jsou však relativně pomalá. U simultánních spektrometrů je možné měřit intenzitu ve více výstupních štěrbinách najednou, z toho důvodu jsou rychlejší.



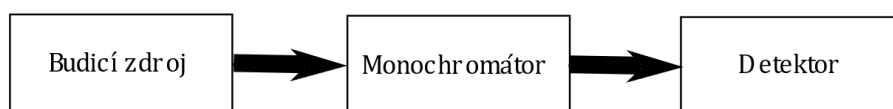
Obr. 3.3: Uspořádání Czerny-Turner [7]

### 3.2.2 Detektor – CCD čip

Charge-coupled device, neboli zařízení s vázanými náboji slouží k detekci záření na dvourozměrné pole pixelů na principu fotoefektu. Výstupní elektrody jsou odděleny pomocí tenké vrstvy SiO<sub>2</sub>. Čtení dat z CCD čipu probíhá postupně, řada po řadě a pixel po pixelu. [3], [7]

## 3.3 Optická emisní spektroskopie (OES)

Pokud elektron v atomu nebo molekule přijme například nárazem jiného elektronu nebo absorpcí fotonu dostatečné množství energie, dojde k jeho přeskočení z nižší energetické hladiny na vyšší. Při následném přechodu z vyšší hladiny na nižší dojde k vyzařování energie formou fotonů, které můžeme poté registrovat měřicími přístroji ve formě emisního spektra. Optická emisní spektroskopie je založena na tomto principu. Na obrázku 3.4 můžeme vidět blokové schéma OES.



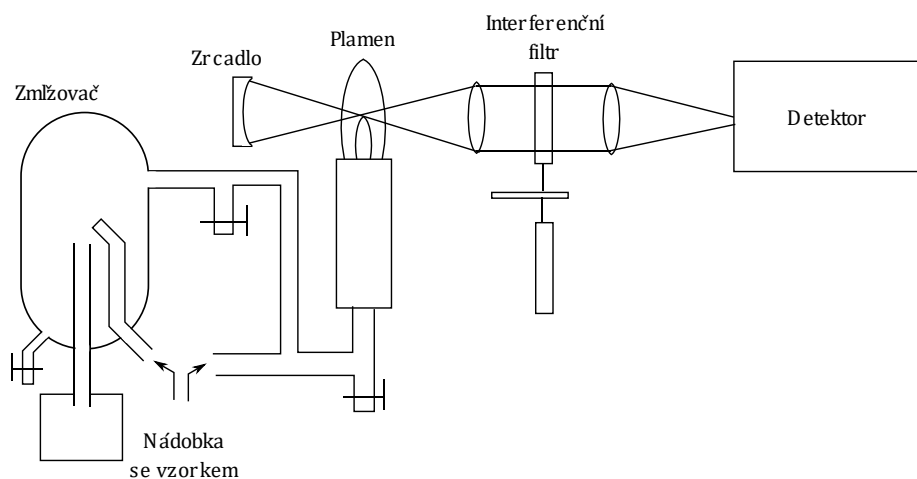
**Obr. 3.4: Blokové schéma optické emisní spektroskopie [8]**

Prvky v měřeném vzorku musejí být pro měření nejprve tepelným buzením excitovány do vyšších energetických stavů. Budicím zdrojem může být např. plamen, elektrický zdroj, plazmový zdroj, laser nebo doutnavý výboj. Výhodou metody je na rozdíl od AAS z následující kapitoly možnost multiprvkového rozboru.

Použití emisní spektroskopie k analýze elektrického oblouku je oproti absorpční spektroskopii výhodné, protože můžeme poměrně jednoduše detekovat fotony vyzářené obloukem a nepotřebujeme přídatný zdroj záření. Metodu lze využít i k výpočtu teploty elektrického oblouku ze spektra. [3], [8]

### 3.3.1 Plamenová fotometrie

Plamenová fotometrie využívá jako budicí zdroj plamen propan-vzduch, acetylen-vzduch nebo acetylen-oxid dusný. Tyto plameny mají relativně nízkou teplotu, proto se používají zejména pro analýzu alkalických kovů a zemin (Na, K, Li, Ca, Mg). Na obrázku 3.5 můžeme vidět schéma plamenového fotometru.



**Obr. 3.5: Plamenový fotometr [8]**

Uspořádání je podobné jako při atomové absorpční spektroskopii, protože u většiny spektroskopů pro absorpční spektroskopii je možné nastavení i pro emisní spektroskopii.

### 3.3.2 Elektrické zdroje

Elektrické zdroje se v praxi používají k analýze železa, oceli a slitin (Fe, Ni, Cu, Zn). Těmito zdroji mohou být stejnosměrné nebo střídavé elektrické oblouky, nízkonapěťové i vysokonapěťové elektrické jiskry nebo řízené oblouky a jejich plazma slouží jako zdroj buzení. V generátoru dochází ke změně výkonu na teplo, ionizační práci, budicí práci a zářivou energii.

Teplota elektrického oblouku je přibližně 3000-8000 K a dochází v něm k velkému přenosu vzorku do výboje. Velmi vhodné jsou grafitové elektrody, které mají dobrou vodivost a neznečišťují měřený vzorek. Obloukové výboje jsou vhodné pro kvalitativní a semikvantitativní rozbor.

Elektrické jiskry mají teplotu až 30000 K, přičemž elektrody tohoto výboje zůstávají studené. Při výbojích dochází k odpaření malého množství vzorku a jsou vhodnější pro kvantitativní rozbor. Řízené oblouky se řadí k jiskrovým výbojům a spojují výhody obloukového a jiskrového výboje.

### 3.3.3 Buzení v plazmatu

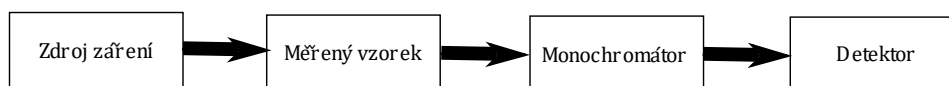
Aby došlo k ionizaci plynu, je nutné dodávat vnější energii. Část této energie je přenesena na vzorek a způsobí excitaci a ionizaci vzorku.

Pro vytvoření plazmy se využívají jednoatomové plyny (např. He, Ar), které, narozdíl od plamenové fotometrie, vytvářejí jednoduchá spektra a umožňují excitaci většiny prvků. Jednoatomové plyny však mají oproti N<sub>2</sub> nebo H<sub>2</sub> nižší tepelnou vodivost.

Plazma se dělí podle typu elektrického pole na stejnosměrně vázané, mikrovlnně vázané a indukčně vázané. [8]

## 3.4 Atomová absorpční spektroskopie (AAS)

Atomová absorpční spektroskopie je založena na principu absorpce elektromagnetického záření atomy měřeného vzorku, které jsou po atomizaci uvedeny do plynného stavu. Na obrázku 3.4 můžeme vidět blokové schéma AAS.



**Obr. 3.6: Blokové schéma atomové absorpční spektroskopie [9]**

AAS je nejběžněji používanou metodou pro rozbor anorganických prvků, a to z důvodu poměrně nízkých provozních nákladů. Hlavním nedostatkem této metody je však to, že většinou není možný víceprvkový rozbor.

Spektrometry pro atomovou absorpční spektroskopii se dělí podle uspořádání na jednopaprskové a dvoupaprskové. Jednopaprskové systémy se vyznačují lepší propustností procházejícího záření a nižším šumem, oproti dvoupaprskovým systémům však mají menší stabilitu, která se projevuje větší proměnlivostí intenzity záření.

Jako zdroje záření se většinou využívají zdroje se spektrem v určitém rozsahu vlnových délek, například výbojky s dutou katodou, bezelektrodové výbojky nebo tzv. superlamps, jen výjimečně jsou využívány zdroje se spojitým spektrem, jako např. xenonové lampy a laserové diody.

Absorpční spektroskopii lze použít i pro měření spekter elektrického oblouku a to tak, že ho ozařujeme zdrojem spojitého záření. Změnou intenzity zdroje ve spektru mizí čáry prvků obsažených v elektrickém oblouku. Při úplném vymizení spektrální čáry ve spektru je na její vlnové délce pohlcená intenzita vyzářená spojitým zdrojem stejná jako intenzita vyzářená elektrickým obloukem. Právě kvůli přídavnému zdroji záření je tato metoda nevýhodná oproti emisní spektroskopii, kde elektrický oblouk sám vyzařuje fotony, které lze detekovat. [3], [9]

## 3.5 Měření teploty pomocí spektroskopie

### 3.5.1 Určení teploty elektrody ze spojitého spektra

Vyzařovací funkci pevných látek můžeme vyjádřit pomocí Planckova vyzařovacího zákona pro absolutně černé těleso s emisivitou, která má hodnotu menší než 1 (emisivita je poměrná veličina, která udává efektivitu vyzařování povrchu pevné látky vzhledem k efektivitě vyzařování absolutně černého tělesa). Vyzařovací funkci popsal Max Planck v roce 1900 a můžeme ji vyjádřit pomocí vzorce:

$$H_{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (3.1)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta,  $c$  je rychlost světla,  $k$  je Boltzmannova konstanta,  $\lambda$  je vlnová délka a  $T$  je teplota. [10]

### 3.5.2 Určení teploty porovnáním dvou spektrálních čar

Teplotu lze ze změřeného spektra určit porovnáním intenzity dvou spektrálních čar, pod podmínkou, že jsou čáry dostatečně blízko sebe. Další podmínkou pro přesné určení teploty je to, že obě čáry představují energii vyzářenou elektrony z různých energetických hladin sestupujícími na stejnou energetickou hladinu. Tato metoda je výhodná především z toho důvodu, že nemusíme znát koncentraci částic v plazmatu.

Pro intenzitu vyzářenou sestupem z hladiny  $m$  na hladinu  $n$  platí vztah:

$$I_{m \rightarrow n} = A_{mn} \cdot h \cdot \nu_{mn} \cdot n_m \quad (3.2)$$



kde  $A_{mn}$  je přechodová pravděpodobnost,  $\nu_{mn}$  je frekvence vyzářené energie a  $n_m$  je koncentrace elektronů na  $m$ -té hladině. Intenzitu spektrální čáry lze určit ze spektra její integrací. Při termodynamické rovnováze platí pro koncentraci  $n_m$  následující vztah:

$$n_m = n \cdot \frac{g_m \cdot e^{\frac{U_m}{k \cdot T}}}{z} \quad (3.3)$$

kde  $g_m$  je váha přechodové pravděpodobnosti,  $U_m$  je energie  $m$ -té hladiny,  $k$  je Boltzmannova konstanta,  $T$  je termodynamická teplota a  $z$  je stavová suma. Pro frekvenci záření platí vztah:

$$\nu_{mn} = \frac{c}{\lambda_{mn}} \quad (3.4)$$

kde  $c$  je rychlost světla a  $\lambda_{mn}$  je vlnová délka vyzářené energie. Po dosazení vztahu pro koncentraci  $n_m$  a vztahu pro frekvenci záření  $\nu_{mn}$  do rovnice 3.2 dostaneme následující vztah:

$$I_{m \rightarrow n} = A_{mn} \cdot h \cdot \frac{c}{\lambda_{mn}} \cdot n \cdot \frac{g_m \cdot e^{\frac{U_m}{k \cdot T}}}{z} \quad (3.5)$$

Rovnice platí i pro druhý elektron sestupující z hladiny  $k$  na hladinu  $n$ :

$$I_{k \rightarrow n} = A_{kn} \cdot h \cdot \frac{c}{\lambda_{kn}} \cdot n \cdot \frac{g_k \cdot e^{\frac{U_k}{k \cdot T}}}{z} \quad (3.6)$$

Abychom se v rovnicích zbavili neznámé koncentrace částic  $n$ , můžeme dát rovnice 3.5 a 3.6 do podílu:

$$\frac{I_{m \rightarrow n}}{I_{k \rightarrow n}} = \frac{A_{mn} \cdot g_m \cdot \lambda_{kn}}{A_{kn} \cdot g_k \cdot \lambda_{mn}} \cdot e^{\frac{U_k - U_m}{k \cdot T}} \quad (3.7)$$

Pro vyjádření teploty rovnici zlogaritmuje:

$$\ln \left( \frac{I_{m \rightarrow n}}{I_{k \rightarrow n}} \right) = \ln \left( \frac{A_{mn} \cdot g_m \cdot \lambda_{kn}}{A_{kn} \cdot g_k \cdot \lambda_{mn}} \right) + \frac{U_k - U_m}{k \cdot T} \quad (3.8)$$

Po úpravě rovnice 3.8 dostaneme vztah pro teplotu:

$$T = \frac{U_k - U_m}{k \cdot \ln \left( \frac{A_{kn} \cdot g_k \cdot \lambda_{mn} \cdot I_{m \rightarrow n}}{A_{mn} \cdot g_m \cdot \lambda_{kn} \cdot I_{k \rightarrow n}} \right)} \quad (3.9)$$

Přechodové pravděpodobnosti  $A_{kn}$  a  $A_{mn}$  a jejich váhy  $g_k$  a  $g_m$  můžeme získat z databáze NIST (National Institute of Standards and Technology) [11]. Tato metoda nám neurčí teplotu úplně přesně, jelikož ji určujeme pouze ze dvou spektrálních čar. Měření může být také zatíženo nepřesnostmi spektrometru a odchylkou plazmatu od lokální termodynamické rovnováhy.

### 3.5.3 Určení teploty pomocí pyrometrické přímky

Stejně jako v předchozí metodě je tato metoda výhodná z toho důvodu, že nemusíme znát koncentraci částic. Oproti předchozí metodě je tato metoda přesnější, protože při ní využíváme více spektrálních čar. Podmínkou je, že čáry jsou vytvářeny elektrony přecházejícími z různých energetických hladin.

Pro intenzitu vyzářenou při sestupu z hladiny  $m$  na hladinu  $n$  platí vztah:

$$I_{m \rightarrow n} \sim \frac{A_{mn} \cdot g_m}{\lambda_{mn}} \cdot e^{-\frac{U_m}{k \cdot T}} \quad (3.10)$$

Po zlogaritmování získáme závislost logaritmu na energii hladiny, ze které elektron sestupuje:

$$f(U_m) = \ln \left( \frac{I_{m \rightarrow n} \cdot \lambda_{mn}}{A_{mn} \cdot g_m} \right) \quad (3.11)$$

Funkce odpovídá přímce, kterou můžeme vyjádřit obecnou rovnicí:

$$f(U_m) \cong a \cdot U_m + b \quad (3.12)$$

Přičemž pro směrnici  $a$  platí:

$$a = -\frac{1}{k \cdot T} \quad (3.13)$$

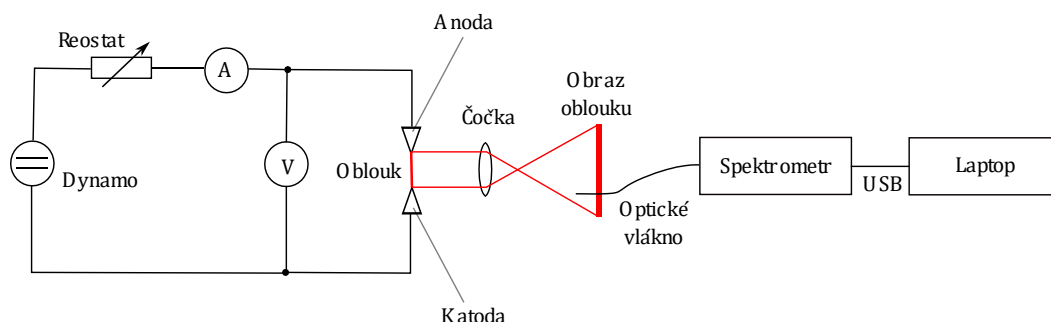
Z této rovnice můžeme vyjádřit vztah pro teplotu:

$$T = -\frac{1}{k \cdot a} \quad (3.14) [3]$$

## 4. ANALÝZA ELEKTRICKÉHO OBLOUKU MEZI DVĚMA ELEKTRODAMI

### 4.1 Měřicí obvod

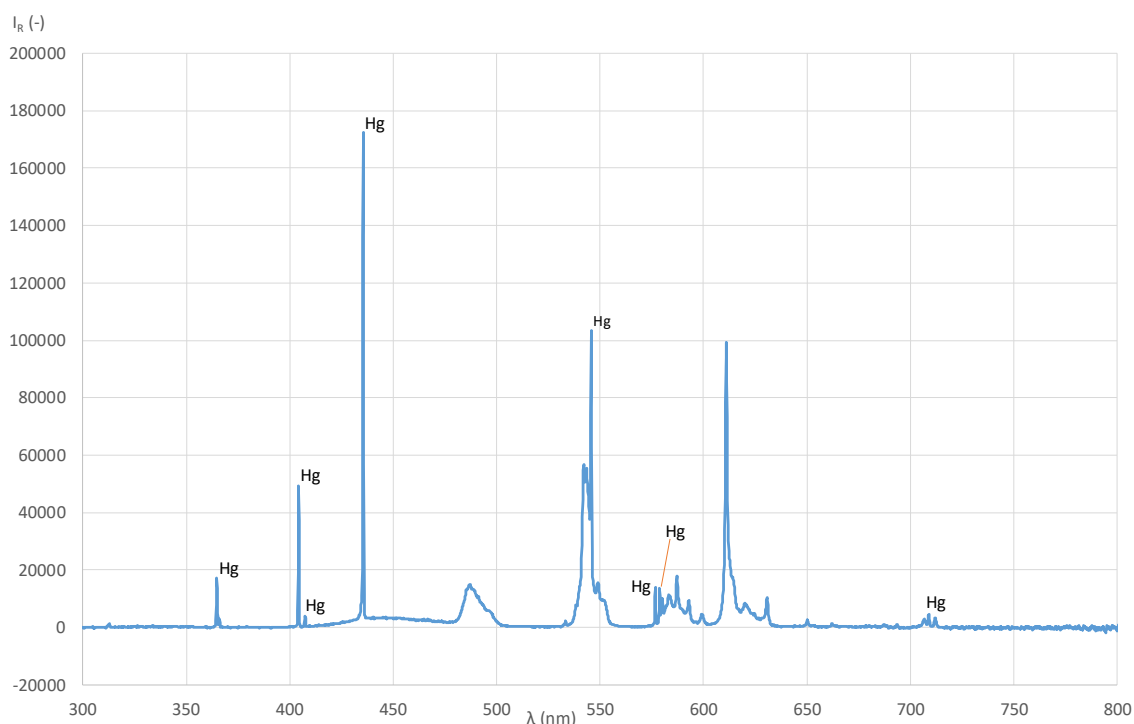
Měření spekter proběhlo na elektrickém oblouku s uhlíkovými elektrodami s měděným jádrem. Na obrázku 4.1 můžeme vidět schéma měřicího obvodu. K napájení obvodu bylo použito dynamo s napětím 100 V, proud procházející obloukem byl v rozmezí 6–10 A a napětí na oblouku bylo cca 40 V. Obraz oblouku byl přes optickou čočku promítán na bílou tabuli, kde k němu bylo přiloženo optické vlákno připojené ke spektrometru. Pro měření byl použit spektrometr od společnosti Avantes AvaSpec ULS3648TEC. Ze spektrometru byla data vedena pomocí USB do laptopu s programem AvaSoft.



Obr. 4.1: Schéma měřicího obvodu

### 4.2 Kalibrace spektrometru

Před samotným rozbořem elektrického oblouku bylo nutné provést kalibraci spektrometru. Relativní intenzita byla kalibrována prostřednictvím normálové lampy. Kalibrace vlnové délky byla ve spektrometru provedena pomocí zářivky. Spektrum zářivky bylo získáno namířením optického vlákna proti zářivce. Ve spektru byly poté identifikovány spektrální čáry rtuti pomocí databáze NIST. Z odchylek vlnových délek mezi naměřenými hodnotami a hodnotami z databáze byla určena průměrná konstanta, která byla použita k posunutí celého spektra ve směru osy x, kterou tvořily jednotlivé vlnové délky.



**Obr. 4.2: Změřené spektrum zářivky**

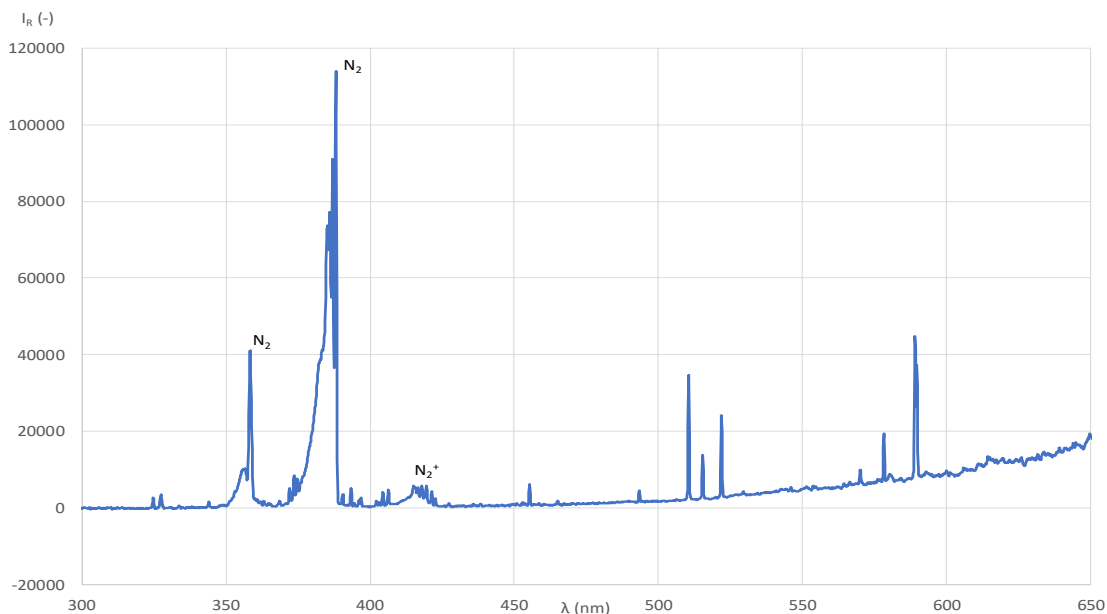
Na obrázku **4.2** můžeme vidět naměřené spektrum s identifikovanými spektrálními čarami rtuti. Všechny vlnové délky nalezených čar jsou vypsány v tabulce **4.1** kde můžeme ve druhém sloupci vidět skutečnou vlnovou délku všech čar získanou z databáze NIST. Třetí sloupec udává rozdíl naměřených a skutečných hodnot. Z těchto rozdílů můžeme získat průměrnou hodnotu, která činí 0,32 nm. O tuto hodnotu byla posunuta všechna spektra měřená pomocí spektrometru AvaSpec doprava ve směru osy x.

**Tab. 4.1: Vlnové délky spektrálních čar rtuti**

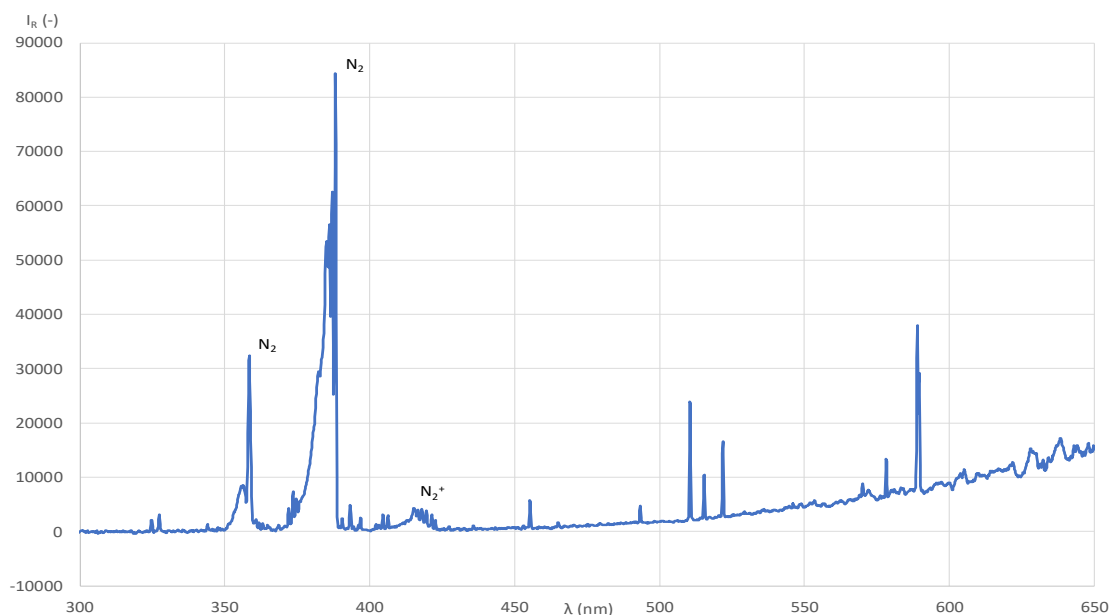
$\lambda_{\text{změřená}}$ (nm)	$\lambda_{\text{databáze}}$ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
364,71	365,02	0,31
404,33	404,66	0,33
407,43	407,78	0,35
435,50	435,83	0,33
545,73	546,08	0,35
576,68	576,96	0,28
578,75	579,07	0,32
708,92	709,19	0,27

### 4.3 Určení teploty ze spojitého záření elektrody

Na obrázcích 4.3, resp. 4.4 jsou spektra ze dvou měření elektrod. V těchto spektrech můžeme vidět tři spektrální pásy molekul dusíku z důvodu přístupu vzduchu do měřeného vzorku. Dále zde můžeme vidět spektrální čáry, ve kterých bychom mohli nalézt například měď, která tvoří jádro elektrod. Pro určení teploty nás ale zajímá především spektrum spojitého záření, které můžeme vidět při vlnových délkách zhruba od 450 nm. Nad 650 nm pro nás spektrum není zajímavé z důvodu omezené citlivosti spektrometru a překrytí spektrem vyššího řádu. [10]

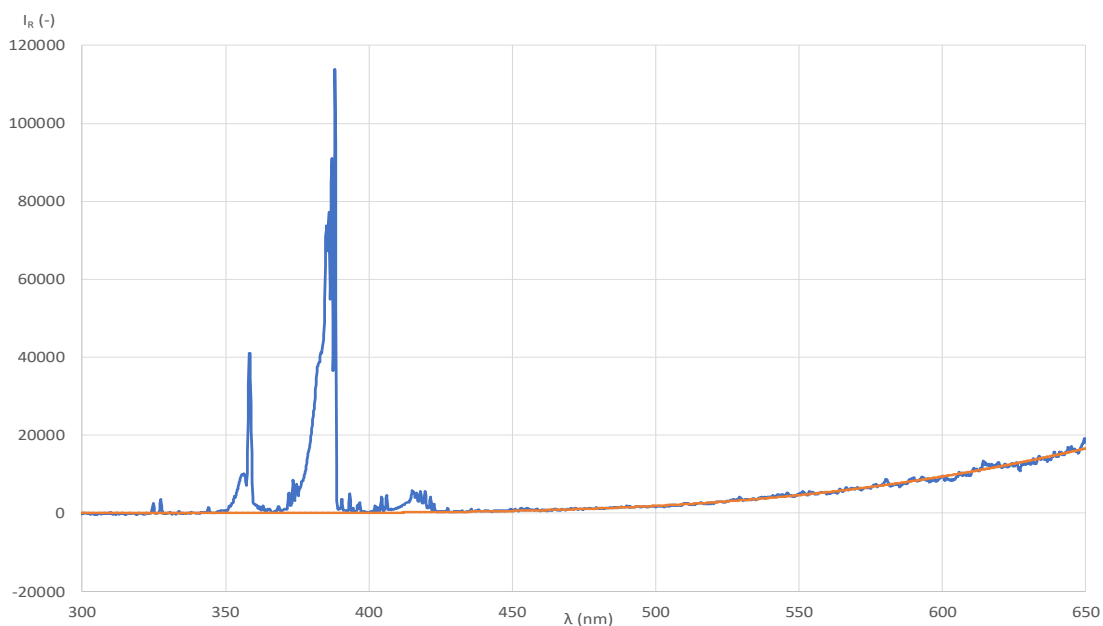


Obr. 4.3: Spektrum elektrody – měření č.1

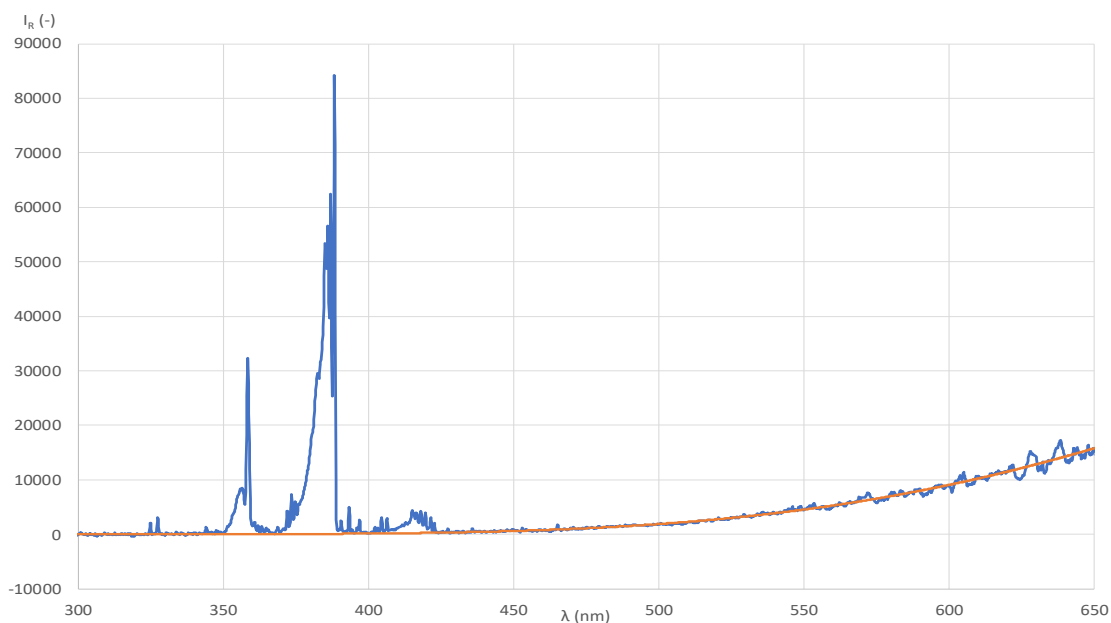


Obr. 4.4: Spektrum elektrody – měření č.2

Teplotu určíme pomocí vzorce 3.1 pro Planckovu funkci. Abychom mohli přesně určit teplotu elektrod, bylo nutné nejprve ze spekter odstranit spektrální čáry, které by způsobily velkou odchylku ve výpočtu. Vložení funkce do spekter provedeme pomocí řešitele (solveru) v programu Microsoft Excel. Solver použijeme pro vlnové délky od 450 do 650 nm kvůli odstranění vlivu molekulových spekter a malé citlivosti spektrometru. Na obrázcích 4.5 a 4.6 můžeme vidět spektra s Planckovou funkcí. Z rovnic těchto funkcí můžeme získat hodnotu termodynamické teploty.



**Obr. 4.5: Spektrum s Planckovou funkcí – měření č.1**

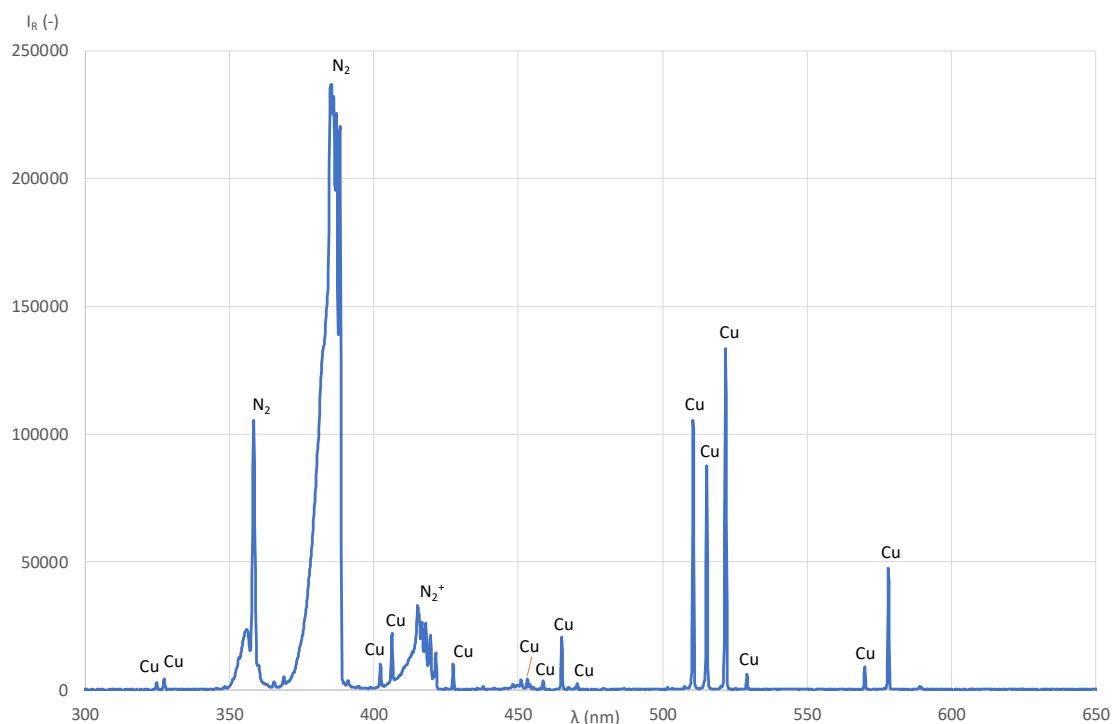


**Obr. 4.6: Spektrum s Planckovou funkcí – měření č.2**

Zjištěná teplota elektrod byla přibližně 1910 K, resp. 1930 K. Je nutné dodat, že změřená teplota závisí na umístění optického vlákna a v různých částech elektrody se může lišit.

#### 4.4 Určení složení plazmatu

K analýze složení plazmatu elektrického oblouku využijeme databázi NIST. Na obrázku 4.7 je změřené spektrum, v němž můžeme opět nalézt molekulové pásy dusíku a několik spektrálních čar, které byly identifikovány jako čáry mědi. Čáry jiných prvků se ve spektru nenacházely, jelikož vzorek neobsahoval jiné prvky než materiál elektrod. V tabulce 4.2 můžeme vidět vypsány všechny vlnové délky identifikovaných čar mědi. První sloupec obsahuje změřené vlnové délky posunuté o změřenou kalibrační konstantu 0,32 nm a druhý sloupec obsahuje vlnové délky získané z databáze NIST.



Obr. 4.7: Spektrum záření plazmatu

**Tab. 4.2: Vlnové délky spektrálních čar mědi**

$\lambda_{\text{kalibrovaná}}$ (nm)	$\lambda_{\text{databáze}}$ (nm)
324,69	324,75
327,35	327,4
402,21	402,26
406,28	406,26
427,40	427,51
453,07	453,08
458,70	458,70
465,12	465,11
470,40	470,46
510,50	510,55
515,25	515,32
521,87	521,82
529,27	529,25
570,02	570,02
578,24	578,21

Je nutné poznamenat, že identifikace prvků může být zatížena chybami, které mohou být způsobeny nepřesností spektrometru a také tím, že databáze NIST neudává podmínky, za kterých byly jednotlivé čáry naměřeny.

## **4.5 Určení teploty plazmatu**

### **4.5.1 Určení teploty porovnáním dvou spektrálních čar**

Jak již bylo řečeno v kapitole 3.5.2, abychom mohli určit teplotu plazmatu, musíme ve spektru vybrat dvě čáry, které mají blízké vlnové délky a jsou vyzářené elektrony sestupujícími z různých energetických hladin na stejnou energetickou hladinu. Z toho důvodu si vypíšeme do tabulky všechny spektrální čáry včetně jejich počáteční a koncové energetické hladiny získané z databáze NIST. Zároveň do tabulky nebudeme uvádět pět nejmenších spektrálních čar, protože mají velmi malou relativní intenzitu, která je příliš blízko intenzitě šumu. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.3, kde druhý sloupec udává energii, na kterou elektron sestupuje, třetí sloupec udává energii, ze které elektron sestupuje a čtvrtý sloupec udává součin přechodové pravděpodobnosti a váhy přechodové pravděpodobnosti.

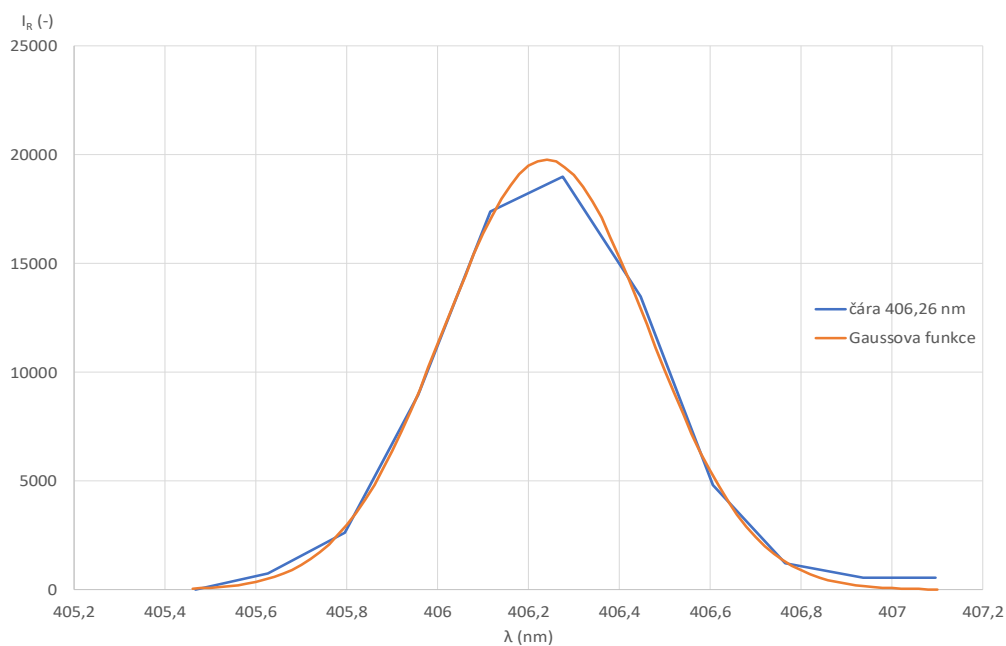


**Tab. 4.3: Energetické hladiny spektrálních čar**

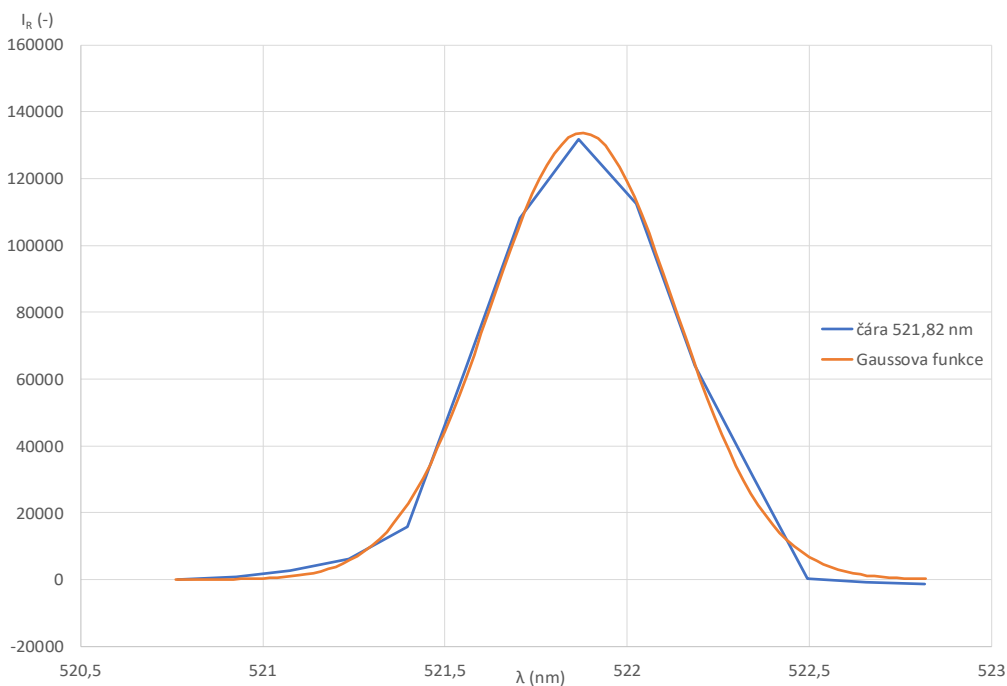
$\lambda_{\text{databáze}}$ (nm)	$U_n$ (eV)	$U_m$ (eV)	$g_k A_{ki}$ (s <sup>-1</sup> )
402,26	3,786	6,867	$7,60 \cdot 10^7$
406,26	3,817	6,868	$1,26 \cdot 10^8$
427,51	4,838	7,737	$2,76 \cdot 10^8$
465,11	5,072	7,737	$3,04 \cdot 10^8$
510,55	1,389	3,817	$8,00 \cdot 10^6$
515,32	3,786	6,191	$2,40 \cdot 10^8$
521,82	3,817	6,192	$4,50 \cdot 10^8$
529,25	5,395	7,737	$8,72 \cdot 10^7$
570,02	1,642	3,817	$9,60 \cdot 10^5$
578,21	1,642	3,786	$3,30 \cdot 10^6$

V této tabulce můžeme nalézt tři dvojice spektrálních čar sestupujících z různých energetických hladin na stejnou, konkrétně jde o vlnové délky 402,26 nm a 515,32 nm, 406,26 nm a 521,82 nm a nakonec 570,02 nm a 578,21 nm. Pro určení teploty byla použita dvojice 406,26 nm a 521,82 nm.

Pro tyto dvě čáry budeme muset vypočítat jejich intenzitu, kterou získáme integrací těchto čar. Integraci provedeme tak, že nejprve z grafu čáry odstraníme šum posunutím začátku a konce čáry do nuly a poté graf proložíme Gaussovou funkcí, jejíž tvar odpovídá skutečnému tvaru spektrální čáry. Redukujeme tak relativně malé rozlišení spektrometru. Poté provedeme integraci Gaussovy funkce lichoběžníkovou metodou. Grafy obou spektrálních čar včetně Gaussových funkcí můžeme vidět na obrázku **4.8**, resp. **4.9**.



**Obr. 4.8: Čára s vlnovou délkou 406,26 nm**



**Obr. 4.9: Čára s vlnovou délkou 521,82 nm**

Pomocí lichoběžníkové metody nám vyšla velikost intenzity čáry 406,26 nm o hodnotě 11161,28 a velikost intenzity čáry 521,82 nm o hodnotě 85323,79. Nyní můžeme dosadit všechny hodnoty do rovnice 3.9, přičemž budeme uvažovat,

že elektron čáry 406,26 nm sestupuje z hladiny  $k$  a elektron čáry 521,82 nm sestupuje z hladiny  $m$ :

$$T = \frac{U_k - U_m}{k \cdot \ln\left(\frac{A_{kn} \cdot g_k \cdot \lambda_{mn} \cdot I_{m \rightarrow n}}{A_{mn} \cdot g_m \cdot \lambda_{kn} \cdot I_{k \rightarrow n}}\right)} = \frac{6,868 - 6,192}{8,61733 \cdot 10^{-5} \cdot \ln\left(\frac{1,26 \cdot 10^8 \cdot 521,82 \cdot 85323,79}{4,5 \cdot 10^8 \cdot 406,26 \cdot 11161,28}\right)} \approx 7760 \text{ K}$$

Je nutné poznamenat, že výsledek může být opět zatížen chybou způsobenou nepřesností spektrometru a proložení Gaussovou funkcí může také zatížit výsledek chybou.

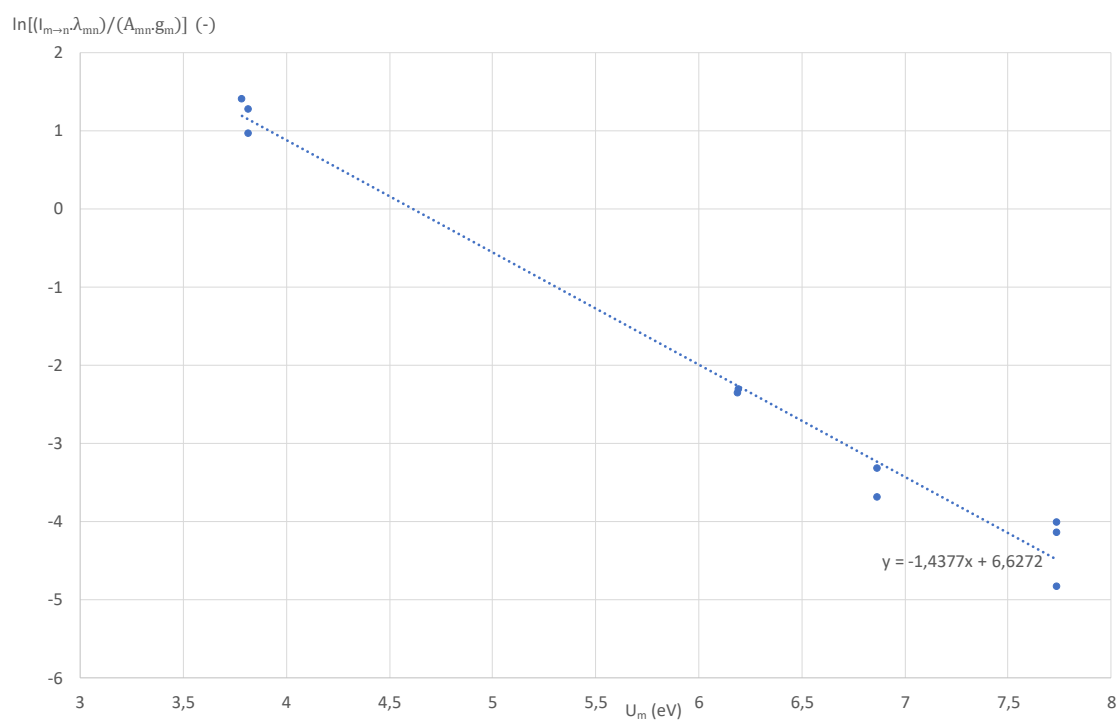
#### 4.5.2 Určení teploty pomocí pyrometrické přímky

Pyrometrickou přímku získáme podle vztahu 3.11 tak, že pro každou čáru vypočítáme hodnotu vztahu  $\ln\left(\frac{I_{m \rightarrow n} \lambda_{mn}}{A_{mn} g_m}\right)$  a získané body dáme do grafu v závislosti na energii hladiny, ze které elektron sestupoval. Pro každou čáru určíme intenzitu čáry stejným způsobem, jako v předchozí kapitole. Všechny vypočítané logaritmy doplněné do tabulky 4.3 můžeme vidět v tabulce 4.4:

**Tab. 4.4: Parametry spektrálních čar mědi**

$\lambda_{\text{databáze}}$	$U_m$	$g_k A_{ki}$	$\ln\left(\frac{I_{m \rightarrow n} \lambda_{mn}}{A_{mn} g_m}\right)$
(nm)	(eV)	(s <sup>-1</sup> )	(-)
402,26	6,867	$7,60 \cdot 10^7$	-3,70
406,26	6,868	$1,26 \cdot 10^8$	-3,32
427,51	7,737	$2,76 \cdot 10^8$	-4,84
465,11	7,737	$3,04 \cdot 10^8$	-4,15
510,55	3,817	$8,00 \cdot 10^6$	1,27
515,32	6,191	$2,40 \cdot 10^8$	-2,37
521,82	6,192	$4,50 \cdot 10^8$	-2,31
529,25	7,737	$8,72 \cdot 10^7$	-4,01
570,02	3,817	$9,60 \cdot 10^5$	0,96
578,21	3,786	$3,30 \cdot 10^6$	1,41

Vynesené hodnoty logaritmů v závislosti na energii hladiny, ze které elektron sestupuje  $U_m$  můžeme vidět na obrázku 4.10:



**Obr. 4.10: Pyrometrická přímka z čar mědi**

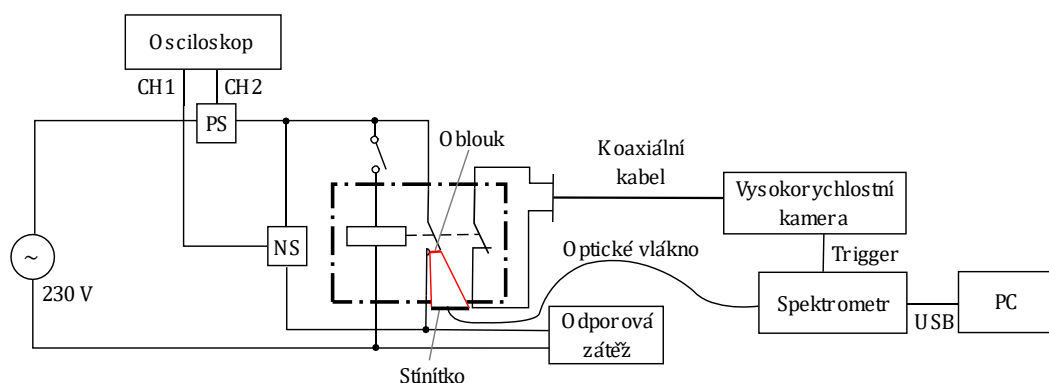
Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.5.3, teplotu určíme ze směrnice proložené přímkou pomocí vztahu 3.14:

$$T = -\frac{1}{k \cdot a} = -\frac{1}{8,61733 \cdot 10^{-5} \cdot (-1,4377)} \approx 8070 \text{ K}$$

## 5. ANALÝZA ELEKTRICKÉHO OBLOUKU VE STYKAČI

### 5.1 Měřicí obvod

Měření spekter proběhlo na kontaktech uvnitř stykače. Na obrázku 5.1 můžeme vidět schéma měřicího obvodu. Obvod je napájen střídavým napětím ze sítě 230 V a cívka stykače je oddělena pomocí spínače. Na stykač je připojena odporová zátěž 2000 W v podobě rychlovarné konvice a na pomocných kontaktech je připojena vysokorychlostní kamera pomocí koaxiálního kabelu, která slouží jako trigger pro spouštění měření spektrometru Andor Shamrock 500I. Spektrometr pomocí optického vlákna upevněného na boční straně stykače měří spektra elektrického oblouku vznikajícího na kontaktech uvnitř stykače. Data jsou poté posílána do stolního počítače se softwarem Andor Solis. Průběh proudu a napětí na kontaktech stykače měří proudová a napěťová sonda osciloskopu.

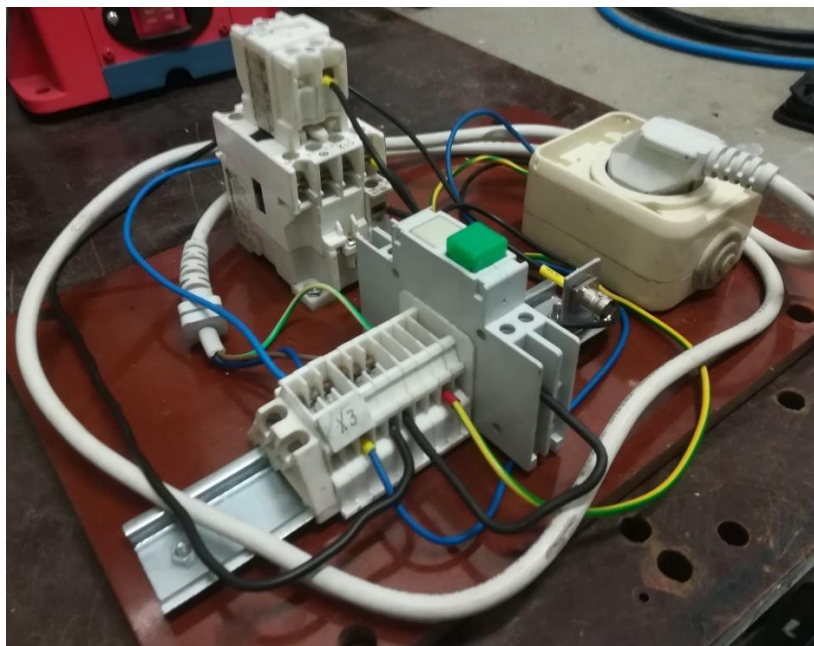


Obr. 5.1: Schéma obvodu pro měření spekter na stykači

Tab. 5.1: Seznam přístrojů použitých pro měření spekter na stykači

Značka	Přístroj	Typ	Výrobní číslo	Parametry
-	Spínač	OEZ MT31	-	230/400 V
-	Osciloskop	Tektronix TPS2012B	C010718	-
PS	Proudová sonda	-	-	10 mV/A
NS	Napěťová sonda	Tektronix TPP0101	-	100 MHz, 10x
-	Konvice	Singer SEK15BSK	-	230 V, 50 Hz, 2000 W

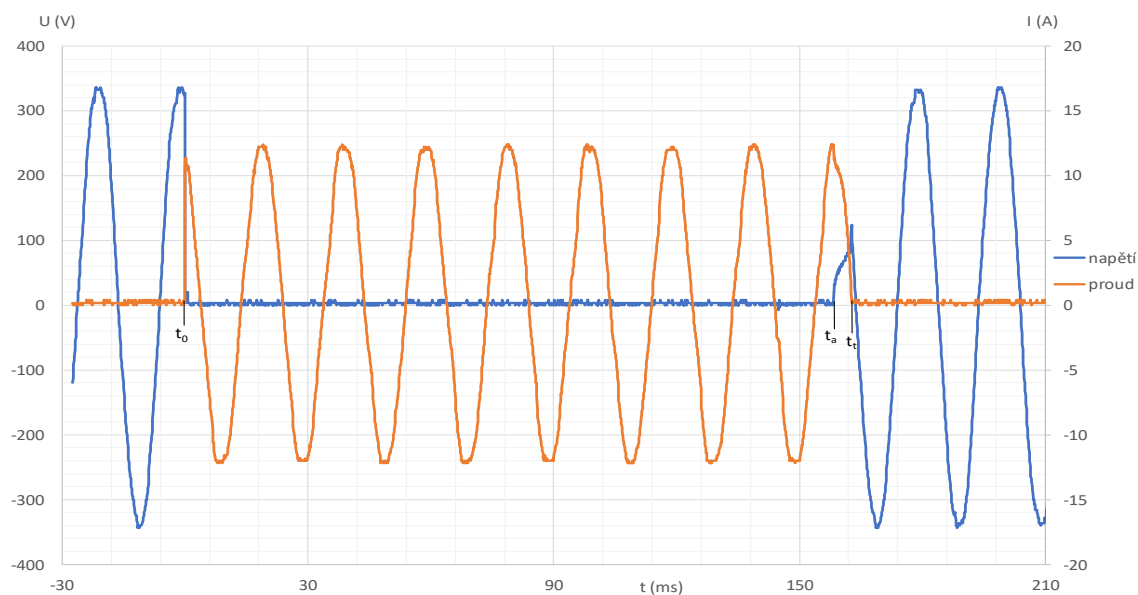
Autor této bakalářské práce vytvořil kompaktní zařízení s upevněným stykačem, kontakty, spínačem cívky a zásuvkou pro připojení odporové zátěže. Tuto sestavu můžeme vidět na obrázku 5.2.



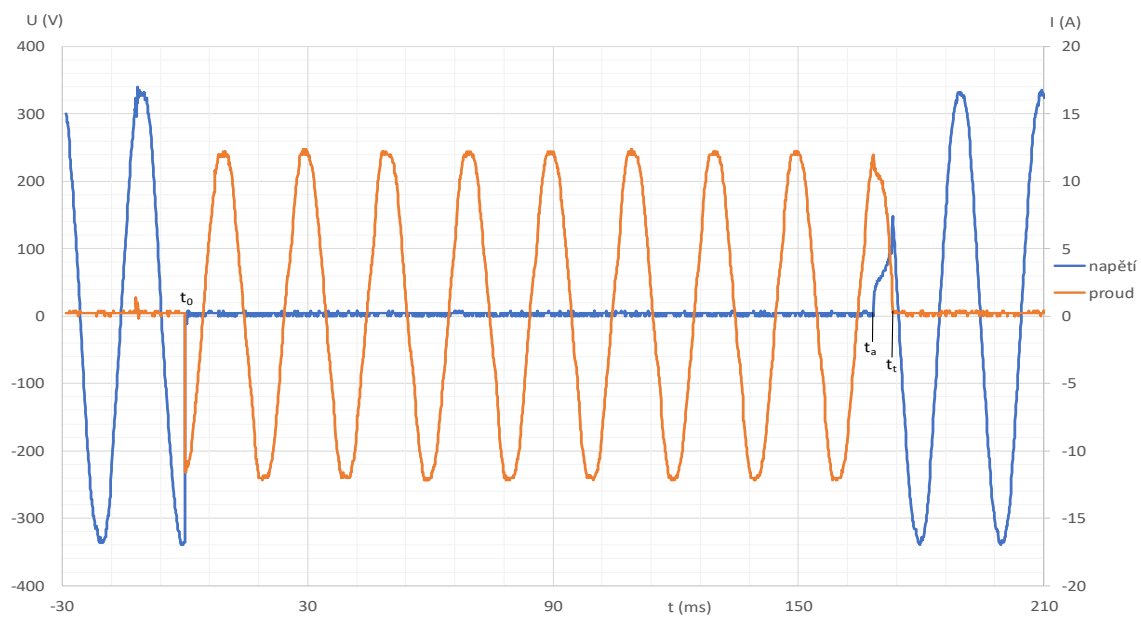
**Obr. 5.2: Sestava pro měření elektrického oblouku na stykači**

## 5.2 Průběh proudu a napětí na stykači

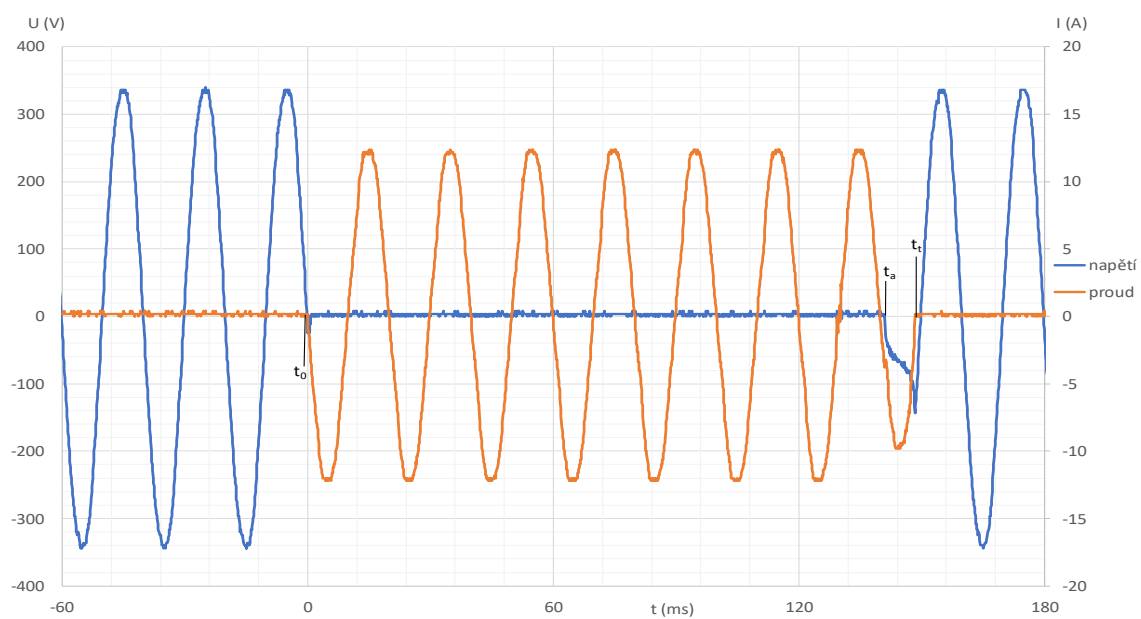
Průběhy proudu a napětí naměřené pomocí proudové a napěťové sondy osciloskopu jsou vyjádřeny na obrázcích 5.3, 5.4 a 5.5.



**Obr. 5.3: Průběh napětí a proudu – měření č.1**



**Obr. 5.4: Průběh napětí a proudu – měření č.2**



**Obr. 5.5: Průběh napětí a proudu – měření č.3**

V obrázcích lze vidět, že v každém měření začíná proud po sepnutí stykače v jiné fázi. Parametry určené z těchto průběhů můžeme vidět v tabulce 5.2.

**Tab. 5.2: Parametry určené z průběhů napětí a proudu**

$\psi$ (°)	$U_{ef}$ (V)	$I_{ef}$ (A)	$U_{amax}$ (V)	$I_{max}$ (A)	$I^2t_p$ (A <sup>2</sup> s)	$I^2t$ (A <sup>2</sup> s)	$I^2t_a$ (A <sup>2</sup> s)	$W_a$ (J)
81,8	237,59	8,77	124	12,4	12,12	12,52	0,4	2,04
69,5	240,42	8,77	148	12,4	12,96	13,31	0,35	2,37
21,8	240,42	8,77	144	12,4	10,84	11,41	0,57	3,64

Můžeme si povšimnout, že nejnižší prošlá energie  $W_a$  byla při úhlu  $\psi = 81,8^\circ$  a nejvyšší byla při úhlu  $\psi = 21,8^\circ$ . Lze tedy vypořádat, že nejnepríznivější podmínky jsou při úhlu vypnutí  $\psi = 0^\circ$ .

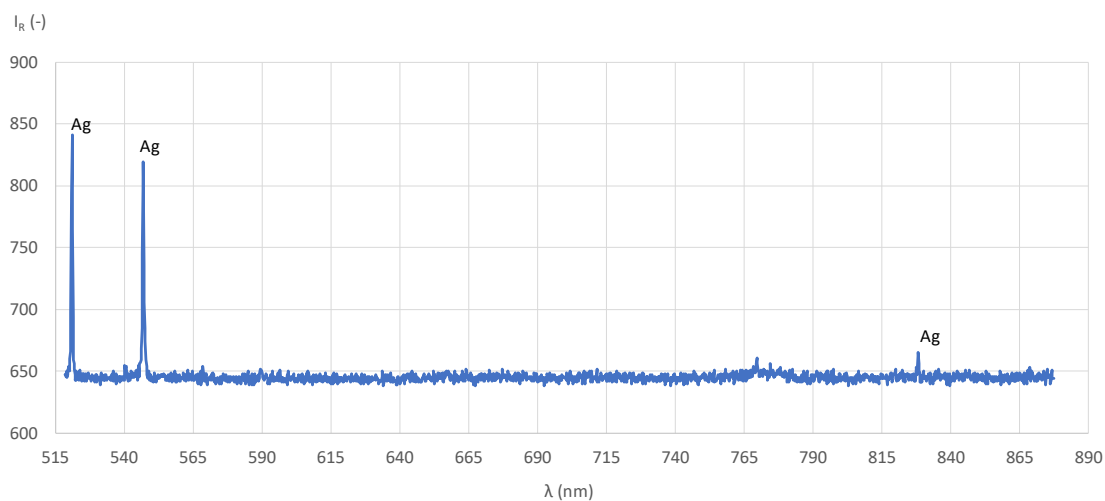
### 5.3 Určení časového vývoje složení

Měření proběhlo na spektrometru Shamrock 500I v módu fast kinetics za použití vysokorychlostní kamery jako triggeru. Nejprve byla provedena kalibrace vlnové délky a intenzity pomocí normálové lampy. Naměřeno bylo 102 spekter, většina z nich zobrazovala pouze šum, protože byla získána až po uhašení oblouku. Pouze v 15 spektrech v čase do 6 ms mohlo být identifikováno složení. Tato spektra můžeme vidět na obrázcích 5.6 – 5.20. Některé spektrální čáry nebylo možno pomocí databáze identifikovat, protože ve spektrech nebyl zjištěn další výskyt prvků, které mají na této vlnové délce podle databáze čáry. Všechny identifikované prvky jsou vypsány v tabulce 5.3.

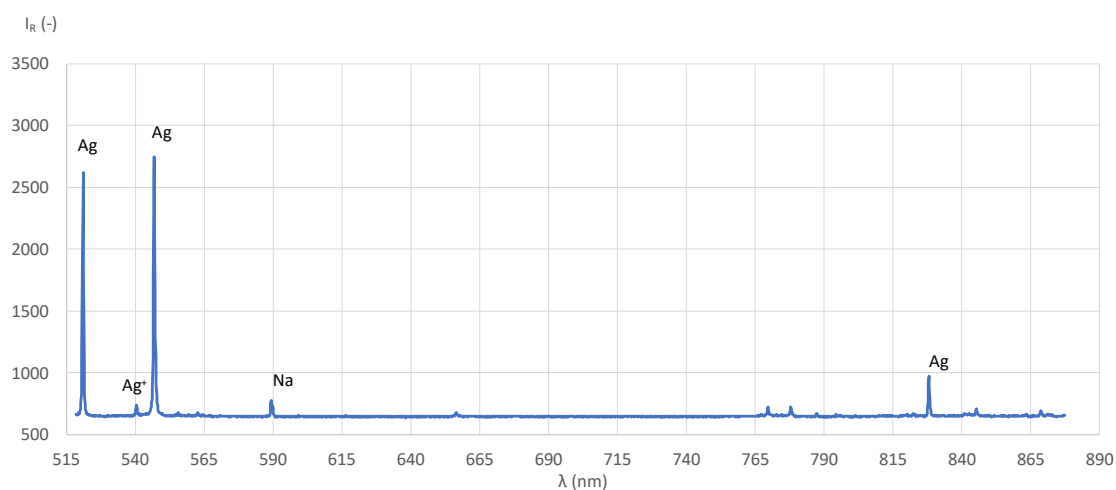


**Tab. 5.3: Identifikované prvky ve spektrech stykače**

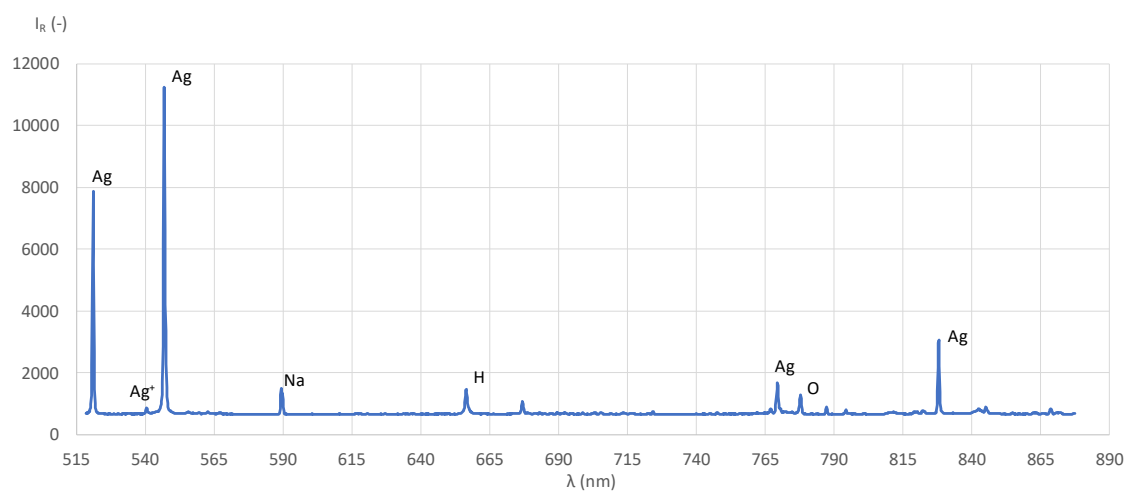
$\lambda_{\text{databáze}}$ (nm)	Prvek (-)
520,91	stříbro
540,01	ionizované stříbro
546,55	stříbro
589,00	sodík
589,59	sodík
656,28	vodík
742,36	dusík
744,36	dusík
746,83	dusík
768,78	stříbro
777,19	kyslík
818,80	dusík
821,63	dusík
824,24	dusík
827,35	stříbro
844,68	kyslík
862,92	dusík
868,34	dusík
871,17	dusík



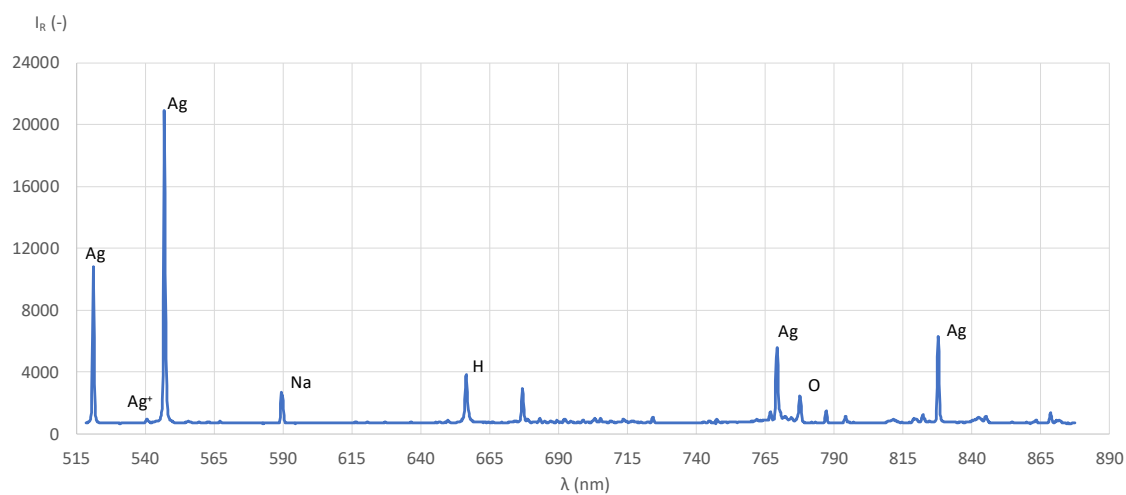
**Obr. 5.6: Spektrum v čase 0,4 ms**



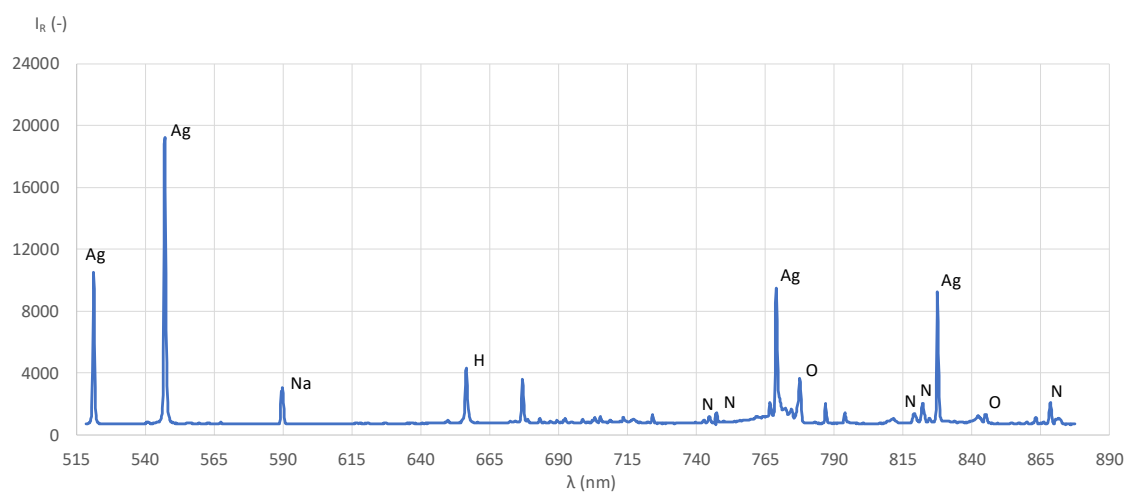
**Obr. 5.7: Spektrum v čase 0,8 ms**



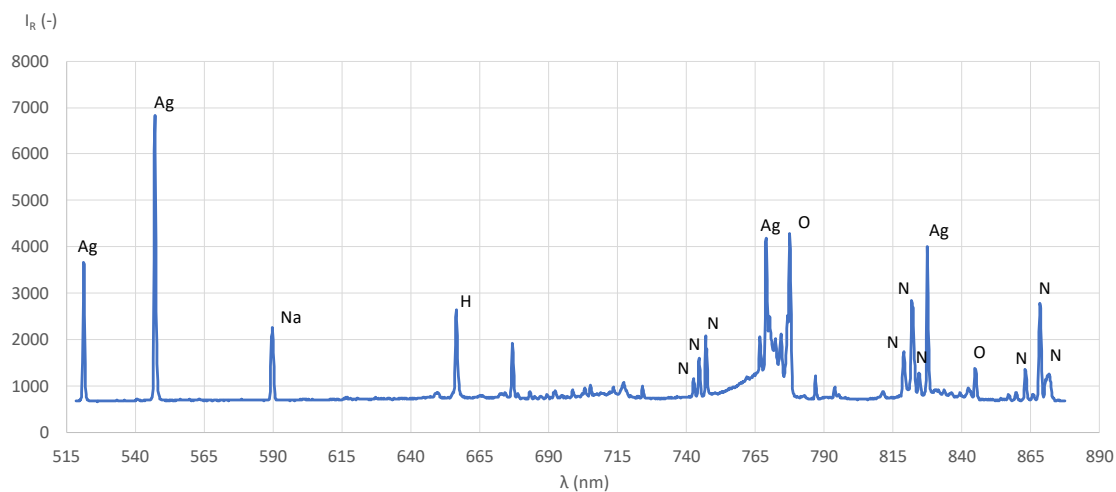
**Obr. 5.8: Spektrum v čase 1,2 ms**



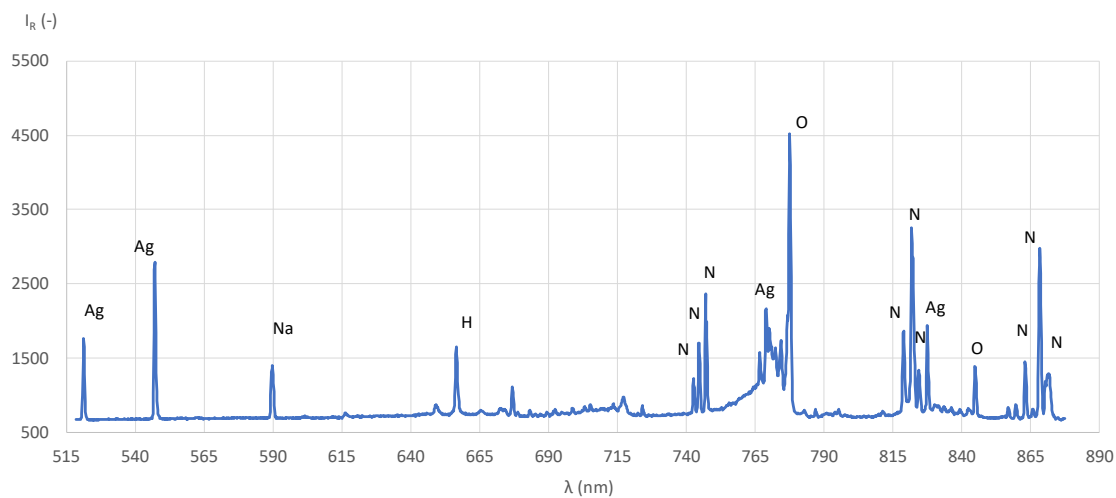
**Obr. 5.9: Spektrum v čase 1,6 ms**



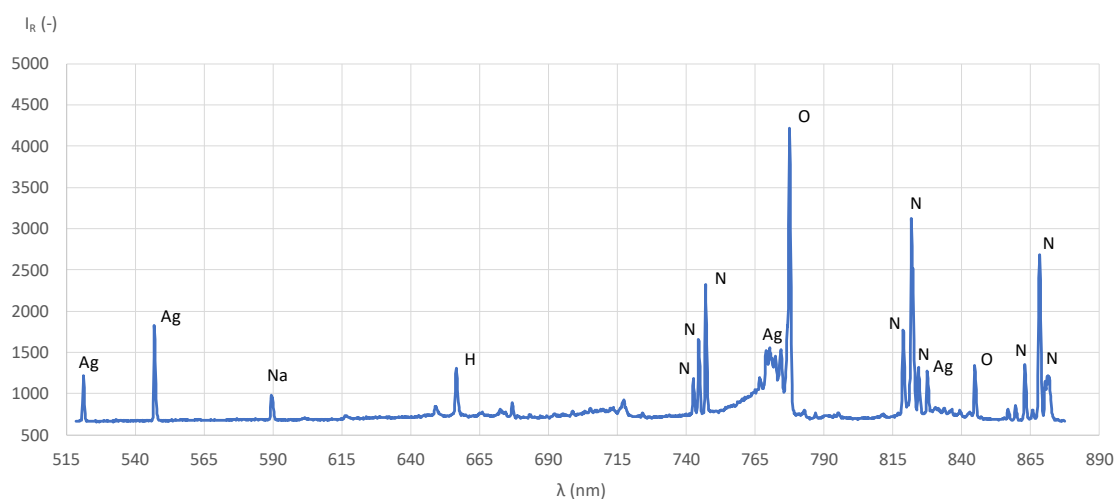
**Obr. 5.10: Spektrum v čase 2,0 ms**



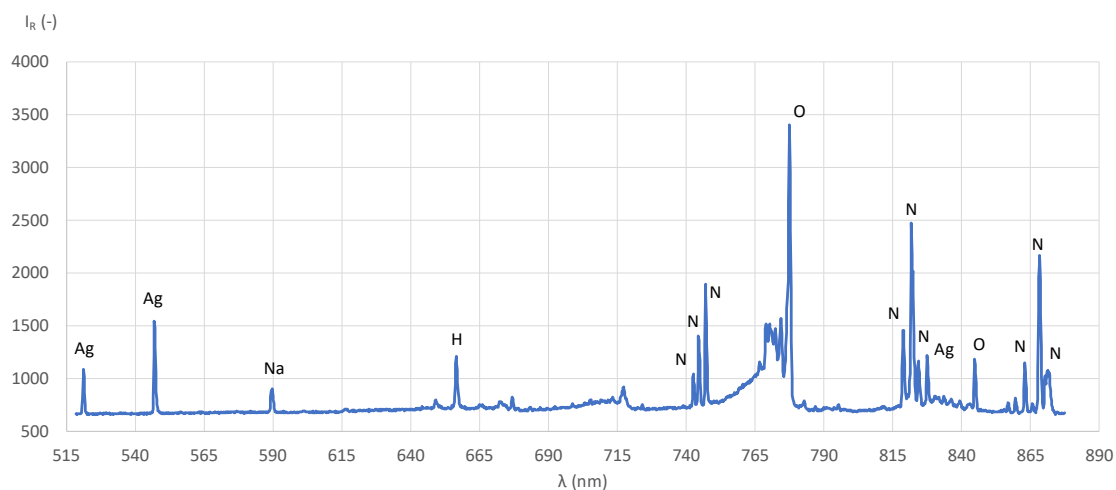
**Obr. 5.11: Spektrum v čase 2,4 ms**



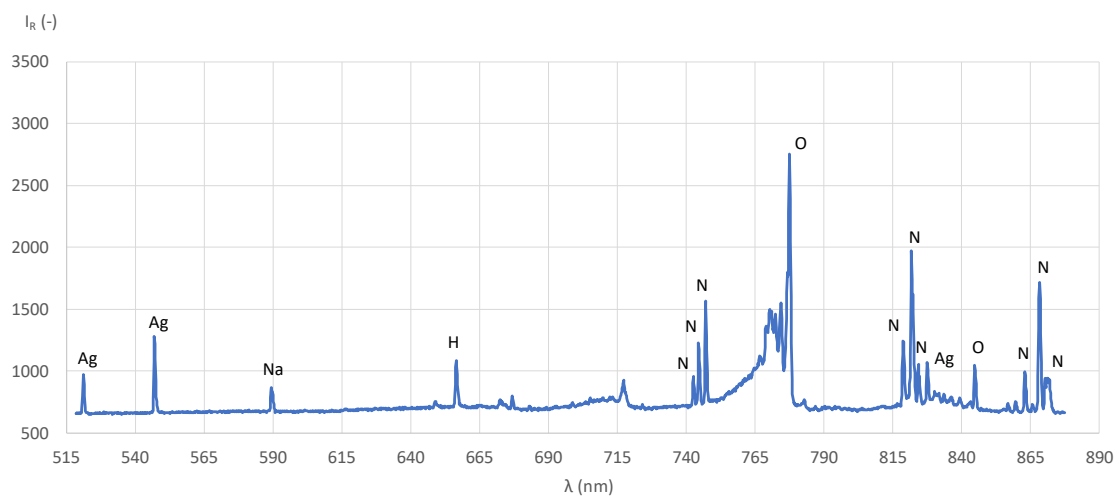
**Obr. 5.12: Spektrum v čase 2,8 ms**



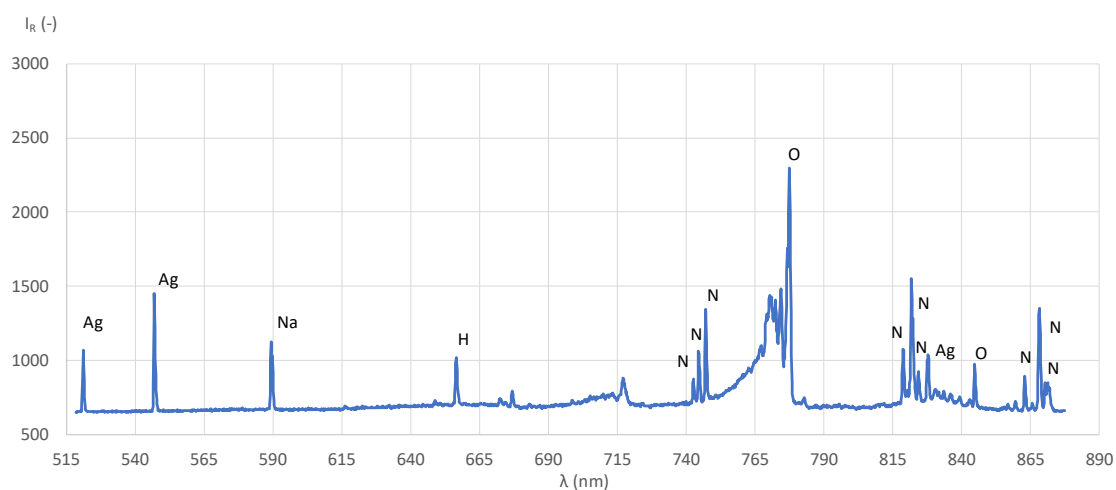
**Obr. 5.13: Spektrum v čase 3,2 ms**



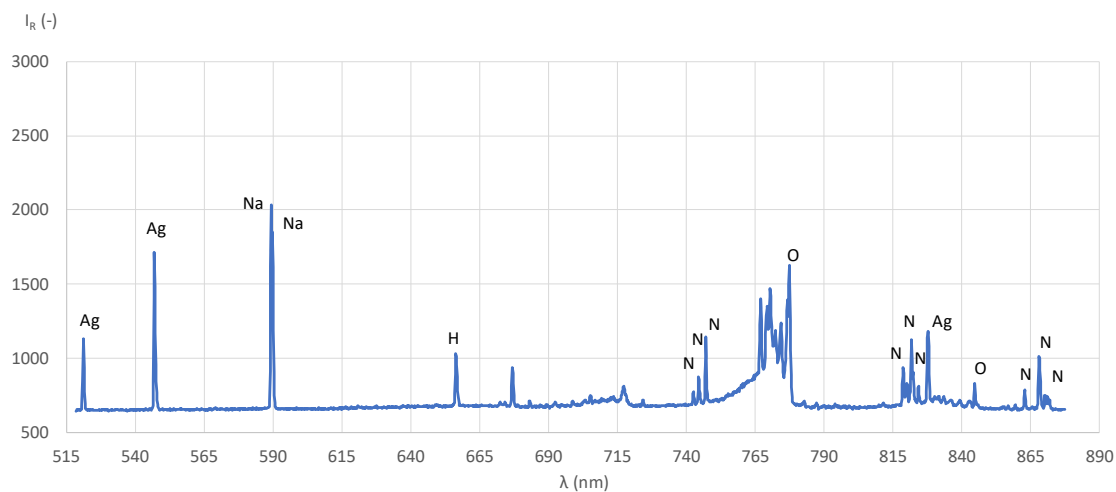
**Obr. 5.14: Spektrum v čase 3,6 ms**



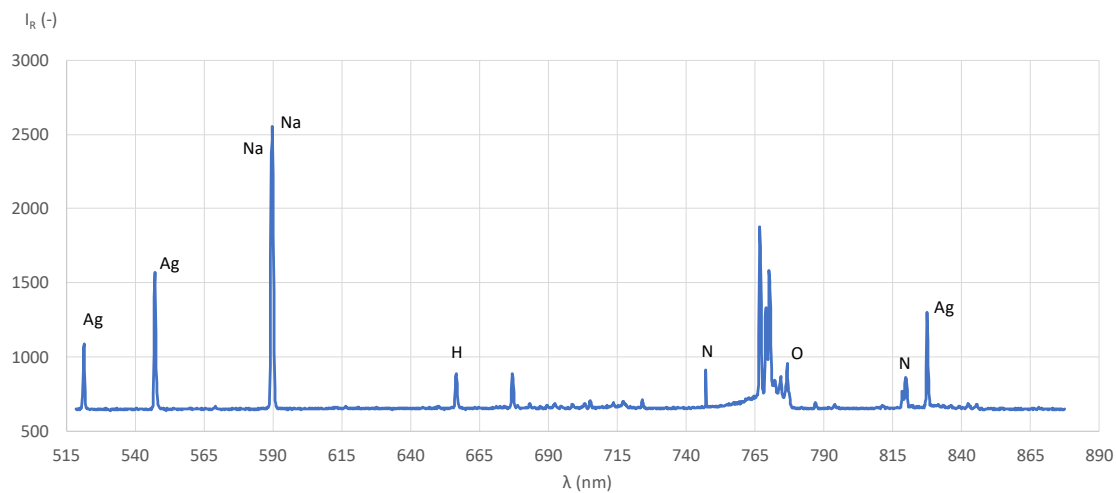
**Obr. 5.15: Spektrum v čase 4,0 ms**



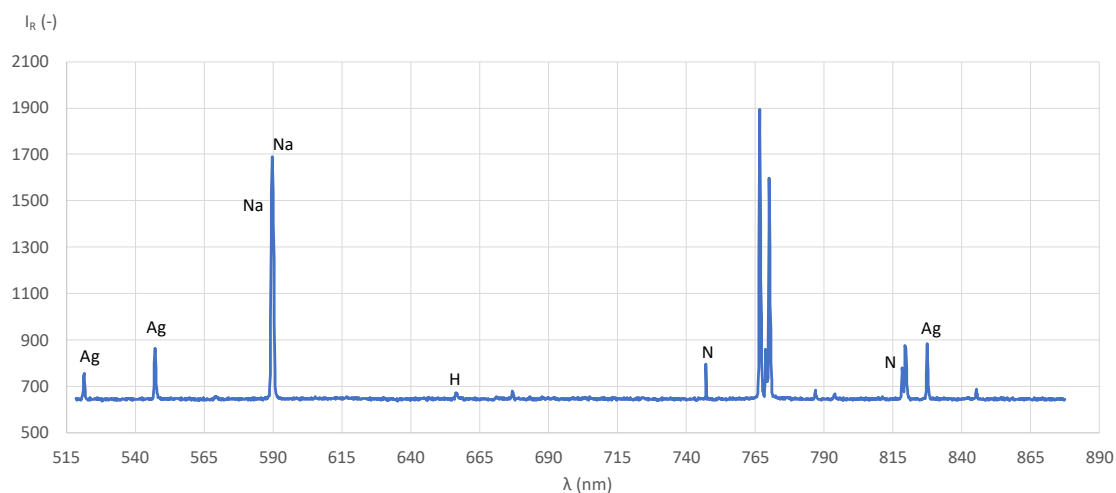
**Obr. 5.16: Spektrum v čase 4,4 ms**



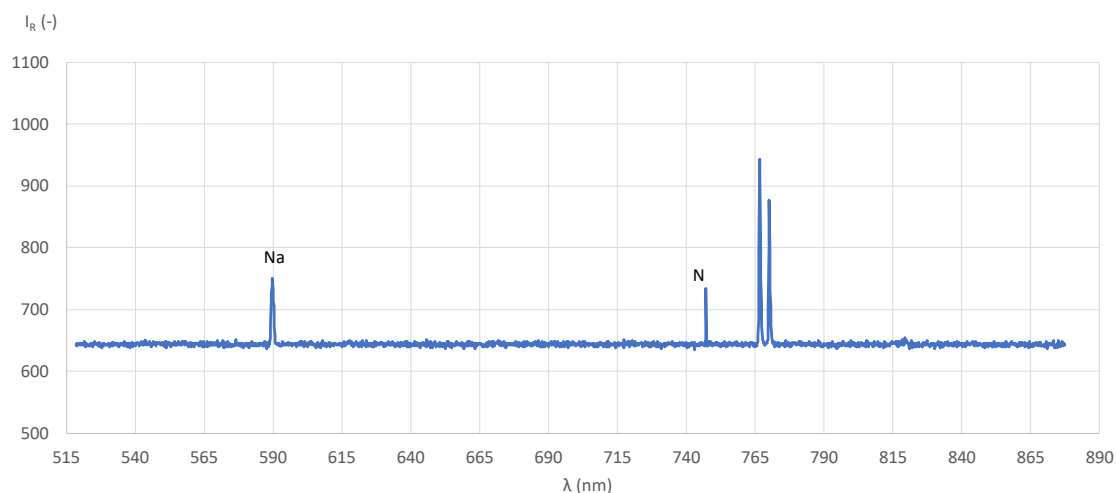
**Obr. 5.17: Spektrum v čase 4,8 ms**



**Obr. 5.18: Spektrum v čase 5,2 ms**



**Obr. 5.19: Spektrum v čase 5,6 ms**



**Obr. 5.20: Spektrum v čase 6,0 ms**

Ze spekter je patrné, že nejprve došlo k prudkému nárůstu intenzity stříbra a bylo možné nalézt i ionizované stříbro. Od 2 ms intenzita stříbra začala postupně klesat až do uhašení oblouku. Od začátku se objevovaly i čáry sodíku, které však až do 4 ms měly relativně nízkou intenzitu, poté intenzita vzrostla a pozvolna klesala do uhašení. Přibližně v čase 2 ms se začaly objevovat čáry dusíku a kyslíku a jejich intenzita dosáhla špičky v čase 2,8 ms.

## 5.4 Určení časového vývoje teploty na kontaktech stykače

### 5.4.1 Určení časového vývoje teploty pomocí dvou spektrálních čar

Jak již bylo řečeno v kapitole 3.5.2, k určení teploty z poměrné intenzity dvou čar je zapotřebí, aby čáry byly dostatečně blízké, a aby elektrony sestupovaly z různých

energetických hladin na stejnou. Jelikož čáry stříbra nesplňují tyto požadavky, bylo nutné využít k výpočtu spektrálních čar dusíku. Parametry potřebné k výpočtu, získané z databáze NIST, můžeme vidět v tabulce 5.4, ve které jsou uvedeny pouze čáry s dostatečně velkou intenzitou pro výpočet.

**Tab. 5.4: Parametry spektrálních čar dusíku**

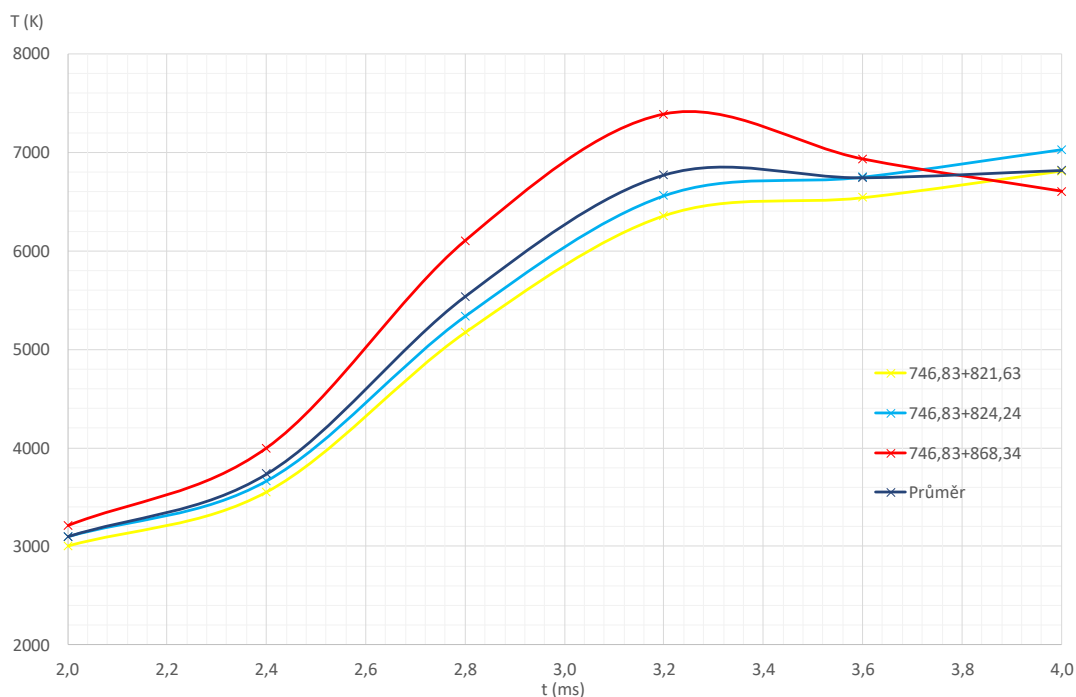
$\lambda_{\text{databáze}}$	$U_n$	$U_m$	$g_k A_{ki}$
(nm)	(eV)	(eV)	(s <sup>-1</sup> )
742,36	10,326	11,996	2,26.10 <sup>7</sup>
744,23	10,330	11,996	4,76.10 <sup>7</sup>
746,83	10,336	11,996	7,84.10 <sup>7</sup>
818,80	10,326	11,840	5,00.10 <sup>7</sup>
821,63	10,336	11,845	1,36.10 <sup>8</sup>
824,24	10,336	11,840	5,24.10 <sup>7</sup>
862,92	10,690	12,126	1,07.10 <sup>8</sup>
868,34	10,336	11,758	1,13.10 <sup>8</sup>

Z tabulky je patrné, že všechny čáry na vlnové délce 746,83 nm, 821,63 nm, 824,24 nm a 868,34 nm sestupují na stejnou energetickou hladinu z různých hladin, proto byly využity k výpočtu teploty. Teplota byla určena porovnáním dvojic 746,83 a 821,63, 746,83 a 824,24, 746,83 a 868,34, a 821,63 a 868,34 ve spektrech v rozmezí 2 až 4 ms s krokem 0,4 ms, které jsou na obrázcích 5.10 – 5.15. Pro výpočet bylo nutné zjistit relativní intenzity všech čar, což bylo provedeno integrací pomocí lichoběžníkové metody v Excelu. Zjištěné intenzity jsou uvedeny v tabulce 5.5.

**Tab. 5.5: Relativní intenzity spektrálních čar dusíku**

$\lambda_{\text{databáze}}$	$I_{R,2}$	$I_{R,2,4}$	$I_{R,2,8}$	$I_{R,3,2}$	$I_{R,3,6}$	$I_{R,4}$
(nm)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
742,36	154,394	295,848	328,238	293,678	216,742	169,850
744,23	348,594	629,992	746,682	681,826	497,238	359,883
746,83	452,782	854,796	1151,100	1096,588	793,100	570,606
818,80	528,494	728,652	793,894	839,772	600,286	434,756
821,63	1280,210	2208,189	2547,108	2277,958	1634,836	1163,743
824,24	208,955	329,255	410,501	349,043	274,771	194,135
862,92	287,827	587,827	614,595	511,528	361,876	258,197
868,34	1327,190	2114,243	2243,428	1975,699	1464,552	1074,677

Po dosazení do vzorce 3.9 byly získány časové průběhy teploty pro každou dvojici. Tyto průběhy můžeme vidět na obrázku 5.21.



**Obr. 5.21: Časový vývoj teploty porovnáním dvou čar**

Ze všech průběhů byl získán průměrný průběh vývoje teploty v čase. Všechny vypočítané teploty můžeme vidět v tabulce 5.6. Můžeme si povšimnout, že nejvyšší průměrná teplota byla v čase 3,2 ms a měla hodnotu přibližně 6800 K.

**Tab. 5.6: Časový vývoj teploty**

$\lambda_k$ (nm)	$\lambda_m$ (nm)	$T_2$ (K)	$T_{2,4}$ (K)	$T_{2,8}$ (K)	$T_{3,2}$ (K)	$T_{3,6}$ (K)	$T_4$ (K)
746,83	821,63	3000	3600	5200	6400	6500	6800
746,83	824,24	3100	3700	5300	6600	6700	7000
746,83	868,34	3200	4000	6100	7400	6900	6600
<b>Průměr teplot (K)</b>		3100	3700	5500	6800	6700	6800

#### 5.4.2 Určení časového vývoje teploty pomocí pyrometrické přímky

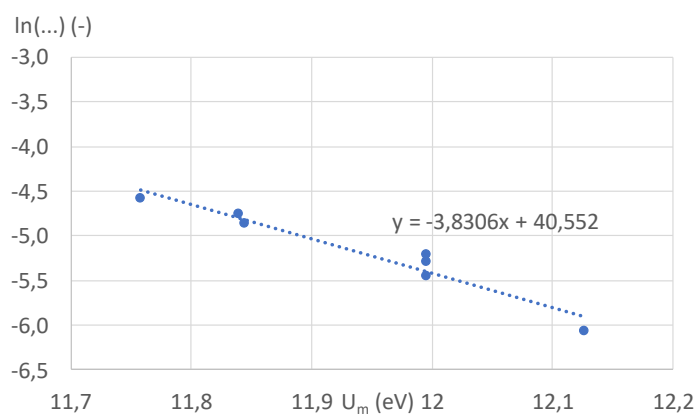
Podobně jako v kapitole 4.5.2 získáme pyrometrickou přímku ze vztahu 3.11 tím, že závislost  $\ln\left(\frac{I_{m \rightarrow n} \lambda_{mn}}{A_{mn} g_m}\right)$  na energii hladiny, ze které elektron sestupoval dáme do grafu. Hodnoty logaritmu můžeme spočítat pomocí parametrů z tabulky 5.4. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.7.



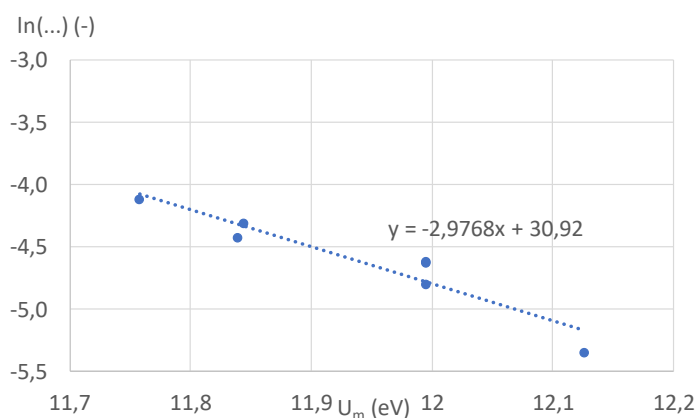
**Tab. 5.7: Hodnoty logaritmů pro získání pyrometrické přímky**

$\lambda_{\text{databáze}}$	$U_m$	$\ln(\dots)_{(2)}$	$\ln(\dots)_{(2,4)}$	$\ln(\dots)_{(2,8)}$	$\ln(\dots)_{(3,2)}$	$\ln(\dots)_{(3,6)}$	$\ln(\dots)_{(4)}$
(nm)	(eV)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
742,36	11,996	-5,28	-4,63	-4,53	-4,64	-4,94	-5,19
744,23	11,996	-5,21	-4,62	-4,45	-4,54	-4,86	-5,18
746,83	11,996	-5,45	-4,81	-4,51	-4,56	-4,89	-5,21
818,80	11,840	-4,75	-4,43	-4,34	-4,29	-4,62	-4,94
821,63	11,845	-4,86	-4,32	-4,17	-4,29	-4,62	-4,96
862,92	12,126	-6,07	-5,35	-5,31	-5,49	-5,84	-6,17
868,34	11,758	-4,59	-4,12	-4,06	-4,19	-4,49	-4,80

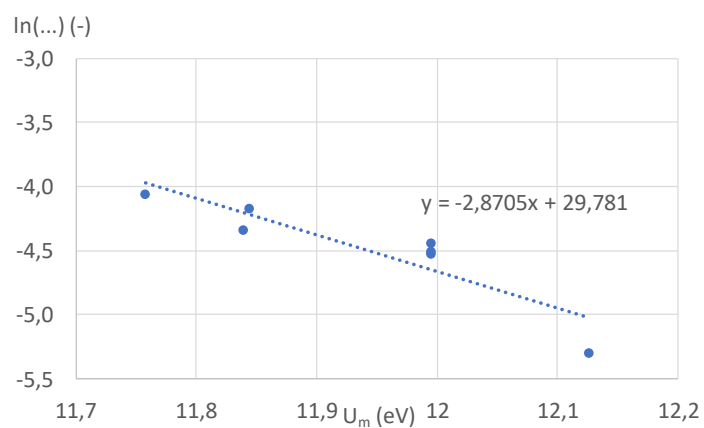
Závislosti logaritmů na energii hladiny, ze které elektron sestupoval, jsou proložené přímkou na obrázcích 5.22 – 5.27.



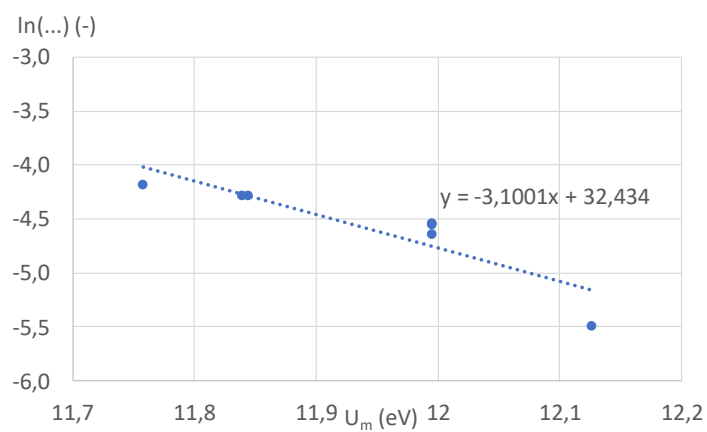
**Obr. 5.22: Pyrometrická přímka pro čas 2 ms**



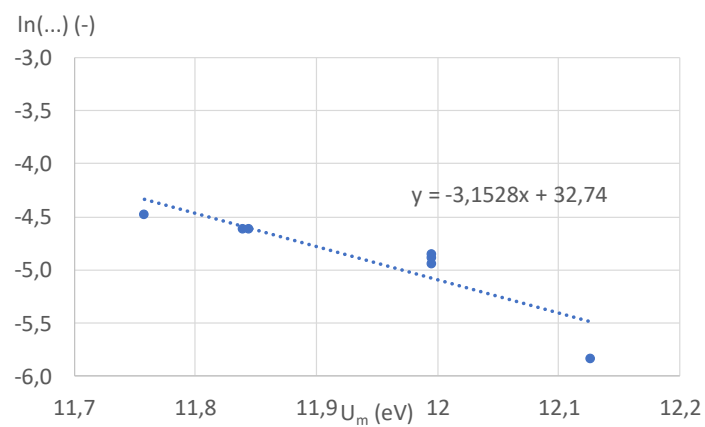
**Obr. 5.23: Pyrometrická přímka pro čas 2,4 ms**



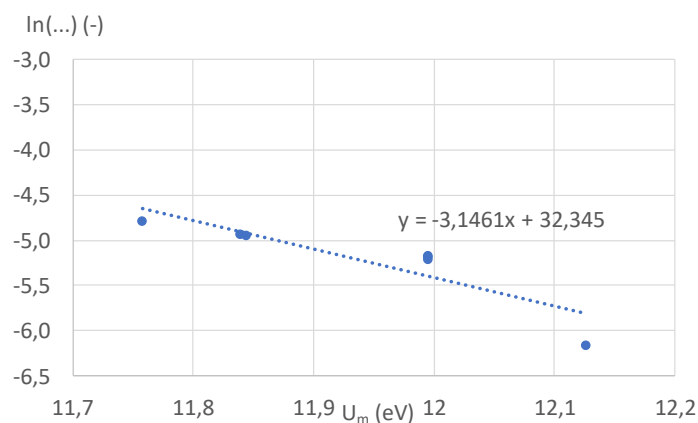
**Obr. 5.24: Pyrometrická přímka pro čas 2,8 ms**



**Obr. 5.25: Pyrometrická přímka pro čas 3,2 ms**



**Obr. 5.26: Pyrometrická přímka pro čas 3,6 ms**

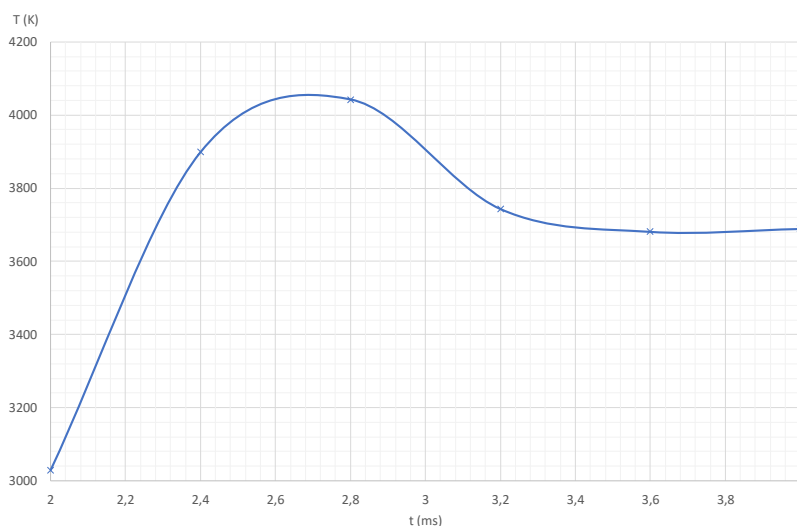


**Obr. 5.27: Pyrometrická přímka pro čas 4 ms**

Ze získaných směrnic proložených přímek získáme pomocí vztahu 3.14 časový vývoj teploty. Vypočítané teploty jsou uvedeny v tabulce 5.8 a vyneseny do grafu na obrázku 5.28.

**Tab. 5.8: Teploty vypočítané pomocí pyrometrické přímky**

t (ms)	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4
T (K)	3000	3900	4000	3700	3700	3700



**Obr. 5.28: Časový vývoj teploty pomocí pyrometrické přímky**

Můžeme si povšimnout, že nejvyšší teplota získaná pomocí pyrometrické přímky dosahuje hodnoty přibližně 4000 K a je tedy nižší než hodnota spočítaná porovnáním dvou čar. To může být způsobeno nepřesnostmi při počítání relativních intenzit spektrálních čar a také nepřesností při proložení bodů pyrometrickou přímkou.

## 6. ZÁVĚR

Práce se zabývala rozbořem složení a teploty elektrických oblouků. První část sloužila k seznámení s teorií o metodách pro analýzu obloukových výbojů pomocí spektroskopie.

V první části praktického měření byly tyto metody využity pro určení vlastností elektrického oblouku, který probíhal mezi uhlíkovými elektrodami s měděným jádrem. Teplota elektrody byla vypočítána ze spojitého spektra pomocí Planckova vyzařovacího zákona. Bylo zjištěno, že výpočet může být nepřesný z toho důvodu, že nemusí být vždy možné zamířit optické vlákno do požadovaného místa pro měření. Složení plazmatu bylo určeno identifikací spektrálních čar pomocí databáze NIST. Teplota plazmatu byla určena dvěma metodami, porovnáním relativní intenzity dvou blízkých spektrálních čar a pomocí pyrometrické přímky. Problémem bylo, že některé spektrální čáry zanášely do výpočtů chybu a bylo nutné je z výpočtů odstranit. Bylo zjištěno, že využití většího počtu spektrálních čar zpřesňuje výpočet, překážkou ale bylo, že některé prvky nemusejí mít ve spektru příliš čar anebo mají jejich čáry příliš nízkou intenzitu.

Ve druhé praktické části byla spektroskopie využita k analýze elektrických oblouků na kontaktech uvnitř stykače. Nejprve bylo nutné do stykače vyvrtat dírky v místech, kde se kontakty nacházely kvůli přístupu optického vlákna a poté byl stykač upevněn spolu se spínačem a kontakty pro připojení dalších částí obvodu na přenosnou desku. Následovalo měření průběhu napětí a proudu ve stykači a časového vývoje spekter, kdy byla použita odporová zátěž v podobě rychlovarné konvice a vysokorychlostní kamera, která sloužila jako spoušť pro měření spektrometru. Ze spekter byl zjištěn časový vývoj složení a poté i teplota oblouku použitím stejných metod jako v předchozí části. Teplotu bylo nutné určit ze spektrálních čar dusíku, kterých bylo ve spektru několik, protože nebyl zjištěn dostatečný počet čar ostatních prvků, jako například stříbra, které se zde také vyskytovalo. Stejně jako v předchozí části bylo potřeba některé spektrální čáry z výpočtů odstranit, protože zanášely do výpočtů nepřesnosti, které mohly být způsobeny špatnou identifikací z databáze nebo příliš malou intenzitou záření.

Cíle bakalářské práce byly splněny a bylo zjištěno několik poznatků ohledně analýzy spekter a přesnosti spektroskopických metod. Výsledky z měření na stykači mohou být dále využity ke zkoumání vlastností elektrického oblouku na kontaktech stykače.

## Seznam použité literatury

- [1] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL, 1985.
- [2] GROSS, Boleslav. *Elektrické výboje v plynech*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1967. Populární přednášky o fyzice.
- [3] ŠIMEK, David. *Působení spínacího oblouku na konstrukci výkonového přístroje NV*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [4] FANTZ, U. Basics of plasma spectroscopy. *Plasma Sources Science and Technology* [online]. 2006, **15**(4), 137-147 [cit. 2019-02-12]. DOI: 10.1088/0963-0252/15/4/S01. ISSN 0963-0252. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0963-0252/15/i=4/a=S01?key=crossref.55c2687ff5694740c0db81c4b07cacd0>
- [5] SCHOLTZ, Vladimír. Nízkoteplotná plazma III – základná diagnostika, spektroskopia. *Aldebaran* [online]. 2012 [cit. 2019-02-14]. Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2012\\_33\\_vla.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_33_vla.php)
- [6] GROSS, Boleslav. *Měření vysokých teplot: určeno vědeckým pracovníkům, výzkumníkům a inženýrům z oboru silnoproudé elektrotechn., fyziky plazmatu, spektroskopie nových metod řezání kovů apod.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. Teoretická knižnice inženýra.
- [7] MILDE, David. Základní části spektrometrů. *Katedra analytické chemie - UP v Olomouci* [online]. 2010 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/02-asx-instrument-1284143883.pdf>
- [8] MILDE, David. Optická emisní spektrometrie. *Katedra analytické chemie - UP v Olomouci* [online]. 2010 [cit. 2019-02-14]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/vmach-03-1347906958.pdf>
- [9] MILDE, David. Atomová absorpční spektrometrie. *Katedra analytické chemie - UP v Olomouci* [online]. 2010 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/vmach-02-1349071108.pdf>
- [10] ŠIMEK, David. Experimental measurements of high temperature objects in contact with an electric arc. In: *Proceedings of the 24th Conference STUDENT EEICT 2018* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018, s. 477-481 [cit. 2019-04-11]. ISBN 978-80-214-5614-3.

- [11] NIST Atomic Spectra Database. *National Institute of Standards and Technology* [online]. Gaithersburg, 2009 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>